



**Уральский  
федеральный  
университет**

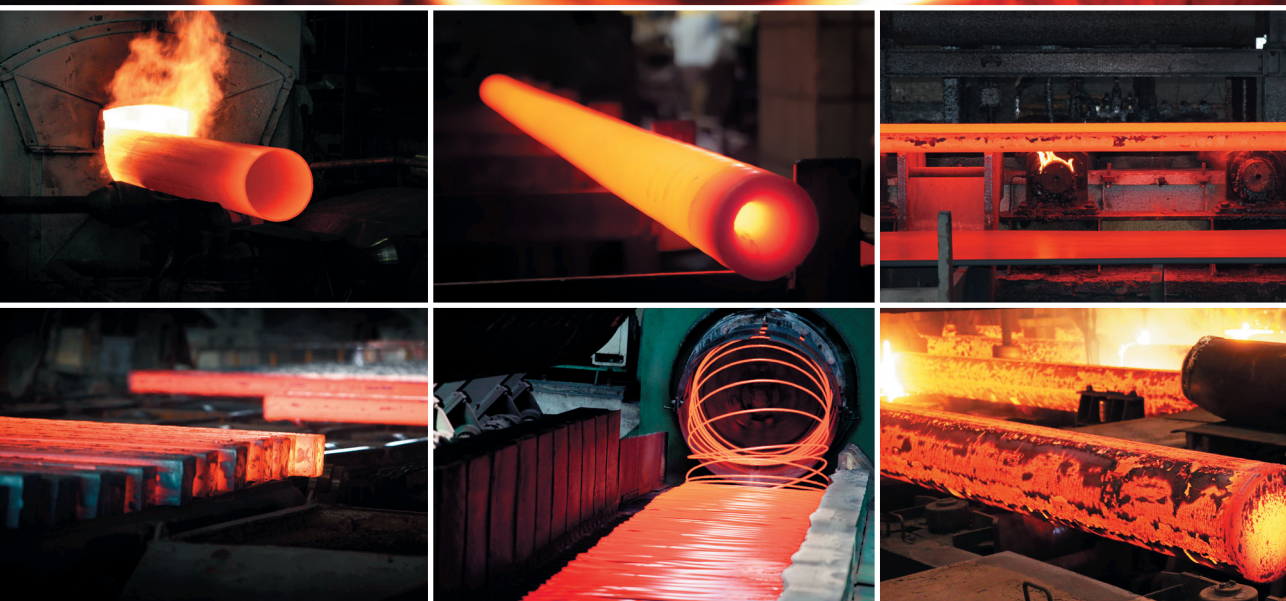
имени первого Президента  
России Б.Н. Ельцина

**Институт  
материаловедения  
и металлургии**

**С. П. БУРКИН  
Г. В. ШИМОВ  
Е. А. АНДРЮКОВА**

# ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ

Учебное пособие



Министерство образования и науки Российской Федерации  
Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

С. П. Буркин, Г. В. Шимов, Е. А. Андрюкова

# **ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ**

Допущено  
учебно-методическим объединением по образованию  
в области металлургии в качестве учебного пособия  
для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по направлению «Металлургия»

Екатеринбург  
Издательство Уральского университета  
2015

УДК 621.77.01(075.8)

ББК 34я-18я73

Б91

Рецензенты:

кафедра подъемно-транспортного оборудования Российского государственного профессионально-педагогического университета (проф., д-р техн. наук В. В. Каржавин);

начальник Центра исследований и разработок ОАО «Первоуральский новотрубный завод», канд. техн. наук А. В. Серебряков

**Буркин, С. П.**

**Б91** Остаточные напряжения в металлопродукции : учебное пособие / С. П. Буркин, Г. В. Шимов, Е. А. Андрюкова. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. — 248 с.

ISBN 978-5-7996-1506-2

Приведен обзор описанных в литературе работ в области остаточных напряжений в металлах. Рассмотрены общие вопросы, касающиеся остаточных напряжений в металлопродукции различных видов. Описаны методы измерения, расчета, управления величиной остаточных напряжений. Представлены некоторые новые разработки в области методик снижения остаточных напряжений в металлопродукции.

Предназначено для студентов (бакалавров и магистров), обучающихся по направлениям УГН 22.00.00 — Технологии материалов, 150400 — Metallurgy.

Библиогр.: 112 назв. Табл. 8. Рис. 50.

УДК 621.77.01(075.8)

ББК 34я-18я73

На обложке использованы фотографии с сайтов:

<http://www.gazprom.com/f/posts/69/291770/dx1m0906.jpg>

[http://www.wireandtubenews.com/wp-content/uploads/2013/01/Loop\\_laying\\_head.jpg](http://www.wireandtubenews.com/wp-content/uploads/2013/01/Loop_laying_head.jpg)

[http://www.siemens.com/press/pool/de/pressebilder/2011/industry\\_solutions/300dpi/IIS201104065-01\\_300dpi.jpg](http://www.siemens.com/press/pool/de/pressebilder/2011/industry_solutions/300dpi/IIS201104065-01_300dpi.jpg)

[http://tselikanov-technologies.com/images/IMG\\_0645.JPG](http://tselikanov-technologies.com/images/IMG_0645.JPG)

[http://kraft.storage.inteprixe.com/images/categories/truba\\_celnotjanutaja.jpg](http://kraft.storage.inteprixe.com/images/categories/truba_celnotjanutaja.jpg)

<http://experttrub.ru/wp-content/uploads/2013/11/termo.jpg>

ISBN 978-5-7996-1506-2

© Уральский федеральный  
университет, 2015

# Оглавление

---

Об авторе.....	5
Памяти Сергея Павловича Буркина .....	6
Введение .....	9
1. Природа остаточных напряжений. Классификация .....	12
2. Влияние остаточных напряжений на эксплуатационные свойства металлоизделий.....	33
3. Экспериментальные методы определения наличия и уровня остаточных напряжений в металлоизделиях .....	49
3.1. Химические методы анализа остаточных напряжений .....	51
3.2. Механические методы анализа остаточных напряжений... ..	58
3.3. Рентгенографические методы определения остаточных напряжений в металлах.....	105
3.4. Поляризационно-оптический метод (метод фотоупругости) .....	121
3.5. Метод оптически чувствительных покрытий.....	124
3.6. Метод голографической интерферометрии .....	124
3.7. Метод электронной спекл-интерферометрии .....	128
3.8. Акустические методы.....	130
3.9. Метод твердости.....	137
3.10. Магнитные методы.....	142
4. Теоретическое описание распределения остаточных напряжений в объеме металлоизделий .....	144
4.1. Теорема о разгрузке.....	144
4.2. Метод решения связанных задач термоупругопластичности .....	151
4.3. Конечно-элементная постановка задачи определения остаточных напряжений в холоднодеформированных трубах и прутках .....	166



5. Остаточные напряжения в холоднодеформированных проволоке, прутках и трубах и влияние параметров обработки.....	178
5.1. Остаточные напряжения в проволоке .....	178
5.2. Остаточные напряжения в трубах.....	193
6. Технологические приемы, направленные на снижение уровня и перераспределение остаточных напряжений в проволоке и трубах .....	198
6.1. Термические методы снижения остаточных напряжений .....	199
6.2. Механические методы снижения остаточных напряжений .....	213
6.3. Технологические приемы, направленные на снижение остаточных напряжений в холодноотянутых металлоизделиях .....	221
Заключение .....	238
Библиографический список .....	239

## Об авторе

---



### **БУРКИН СЕРГЕЙ ПАВЛОВИЧ**

Сергей Павлович Буркин родился 19 июля 1941 г. в г. Верхний Уфалей Челябинской области в семье служащих. В 1960 году окончил техническое училище № 5 (г. Свердловск) по специальности слесаря по ремонту промышленного оборудования. Работал (1960–1962 гг.) в цехе № 82 Уралмашзавода слесарем-ремонтником 5 разряда. Служил (1962–1965 гг.) в Советской Армии механиком по вооружению самолетов дальней авиации. В 1969 г. окончил Уральский политехнический институт им. С. М. Кирова с квалификацией инженер-металлург. Работал лаборантом (1965–1966 гг.), техником-механиком (1967 г.), инженером (1967–1968 гг.), старшим инженером (1968–1970 гг.), старшим научным сотрудником (1970–1974 гг.), доцентом (1974–2005 гг.) и профессором кафедры ОМД (2005 г.). Кандидат технических наук (1972 г.), старший научный сотрудник (1974 г.), академический советник Академии инженерных наук РФ.

Основные направления научной деятельности — разработка и исследование технологических процессов прямого совмещения операций и процессов металлургического производства и процессов комбинированного нагружения при обработке металлов давлением.

Подготовил 5 кандидатов наук. Имеет 120 авторских свидетельств и патентов РФ на изобретения. Автор 430 печатных работ, в т. ч. 6 монографий, учебников и учебных пособий.

Почетный работник высшего профессионального образования РФ (2000 г.). Награжден многими медалями, в т. ч. ВДНХ.

## Памяти Сергея Павловича Буркина

---

Пятьдесят лет назад, в 1964 году, я поступил в заочную аспирантуру к профессору Тарновскому И.Я., и он направил меня в группу к тогда еще доценту Леванову А. Н. В группе велись работы по экспериментальному исследованию контактных напряжений в процессах прокатки, штамповки и осадки, оставалось волочение. В аспирантуру я был направлен из ВНИИМетиза (институт проволоки), процесс волочения был мне знаком, и я сразу начал сотрудничать с участниками этой группы. Алексей Николаевич Леванов был не формальным, а фактическим руководителем, который ставил задания на очень короткие сроки и ежедневно осмысливал результаты.

Экспериментальные исследования волочения оказались очень сложными в силу специфики процесса и продвигались очень медленно. В 1966 году заведующий кафедрой Тарновский Иосиф Яковлевич предложил мне перейти в очную аспирантуру. Я получил место в общежитии и теперь целые дни проводил в лаборатории кафедры, где и начал близко сотрудничать с Буркиным Сергеем Павловичем, к тому времени демобилизовавшимся из Советской Армии и учившимся на вечернем отделении УПИ.

С самого начала своей трудовой деятельности на кафедре Буркин С. П. оказался ценнейшим сотрудником, так как имел заводской (уралмашевский) опыт механосборочных работ, навыки слесаря-универсала после окончания технического училища. У меня, например, до этого только на первом курсе в первом полугодии был ХОМ (холодная обработка металла), где я сделал молоток.

Прежде всего Сергей Павлович навел порядок в инструменте. Появились все необходимые сверла, метчики и плашки. Но остро стояла нехватка металлообрабатывающих станков. Да и не было места для их размещения. Глядя на то, как рядом с лабораторией, расширяя столовую химфака, делают пристрой, я предложил идею таким же образом расширить площадь лаборатории. Сергей Павлович меня активно поддерживал, и нам удалось этой идеей зажечь заведующего кафедрой. Про-

ект был сделан, финансирование выделил институт при условии нашей рабочей силы. И мы ее обеспечили. Но только Сергей Павлович все время строительства не снимал с себя рабочую спецовку и сапоги, а штрабу (паз в кирпичной стене) для установки потолочных плит вырубил отбойным молотком лично. В память о том незабываемом времени у меня сохранился армейский ремень со звездой на пряжке, который как-то подарил мне Сергей Павлович. Когда я вспоминаю Сергея Павловича, то его облик именно этого времени встает передо мной — коренастый, физически очень развитый (он мастер спорта по акробатике), в одежде, забрызганной цементом, и с обаятельной улыбкой.

В итоге кафедры получила дополнительно три комнаты для исследователей и примерно 60 квадратных метров для механической мастерской. У кафедры были хорошие связи с производителями, и вскоре в мастерской стояли станки токарные, строгальный, фрезерный, сверлильный и верстаки для слесарных работ. На токарных станках работал штатный токарь, а на всем остальном — умел работать Буркин С. П. Нужно сказать, что по вечерам у него были занятия на вечернем факультете. Учеба никаких затруднений не вызывала, и диплом он защитил по результатам своих исследовательских работ, ведущихся в лаборатории.

Необходимо подчеркнуть, что немало времени у него отнимала общественная работа. В армии Сергей Павлович служил механиком по вооружению самолетов дальней авиации, очевидно, хорошо служил, и вернулся в УПИ кандидатом в члены КПСС. Наиболее заметной общественной нагрузкой у него в то время была работа в участковой избирательной комиссии. Будучи членом КПСС, стал председателем совета ОПП студентов (общественно-политическая практика). Общественная работа была обязательным атрибутом той нашей жизни.

Буркин С. П. стал в лаборатории стержнем, вокруг которого образовалась группа молодых людей — Бреньков А. В., Солошенко В. М., Щипанов А. А., Суворков В. В., Янушевский Л. В., Соколовский М. В. Практически все они учились в УПИ, занимались исследованиями в лаборатории. Радужными перспективами был усеян горизонт.

Но тут жизнь повернулась другим боком. В университете г. Аннаба (Алжир) на кафедре обработки металлов потребовался преподаватель ОМД. Многие изъявили желание поехать туда, но выбрали Буркина С. П. Он проходил по возрасту и здоровью, а сам он этот выбор

объяснял тем, что как член КПСС будет платить партийные взносы в Аннабе в валюте. Уезжал он на два года и на вокзале перед посадкой в московский поезд просил меня сохранить коллектив лаборатории. Сделать это было не просто, нужны были хозяйственные договоры. Однако два года мы продержались. Но тут — он остался еще на два года. Группа держалась из последних сил. Четыре года держаться на инженерных и лаборантских ставках было сложно, у всех появились семьи.

Сергей Павлович был неутомимым тружеником. Не случайно, когда в 1974 году Леванов А. Н. собирал авторский коллектив для второй монографии по контактным напряжениям, он поставил его на второе место после себя. До конца жизни Буркин С. П. непрерывно работал, принимая прорывные решения в области ОМД. На книжной полке у меня стоят еще пять монографий, написанных под его руководством в последние годы жизни, общий объем которых составил 2065 страниц.

В заключение хочу сказать, что я благодарен судьбе за то, что она свела меня с таким человеком. Память о Сергее Павловиче Буркине долго будет жить в сердцах его соратников, учеников, друзей, а прежде всего в его научных трудах, в установках, сделанных его руками. Особенно я вспоминаю Сергея Павловича каждый раз, когда сажусь проектировать какое-либо устройство и достаю миллиметровую бумагу. Сергей Павлович говорил: «Молодцы американцы — придумали такую бумагу. Можно на коленке в масштабе сделать чертеж». Я думал, откуда это, а потом понял — еще в технических училищах учили делать эскизы на писчей бумаге, линованной в клетку, мягким карандашом. Все свои замечательные проекты он сделал «с нуля» на миллиметровке, воплощая затем в металле и достигая научного результата.

*Б. Р. Картак*  
*доцент кафедры ОМД УрФУ*

## Введение

---

**П**од технологией производства любых металлоизделий следует понимать лишь ту совокупность металлургических переделов, операций и приемов, которая гарантированно обеспечивает получение продукции надлежащего качества. При этом качество должно быть строго определено регламентированной совокупностью количественных показателей, измерение которых возможно с необходимой точностью при существующем на данном этапе развития метрологическом обеспечении.

При изучении причин, вызвавших ухудшение качества металлургической продукции, в частности стальных труб, или в поисках возможности его улучшения следует в качестве первого этапа исследования принимать выявление влияния металлургического отклонения качества исходного металла от номинала. Затем следует убедиться в правильности режима термической обработки исходных заготовок. Вторым этапом исследований можно назвать саму технологию обработки давлением. Только третьим этапом выявления причин ухудшения качества, особенно холоднодеформированной металлопродукции, можно назвать исследование остаточных напряжений, возникающих при деформации, термической обработке, отделке, хранении и машиностроительном применении металлоизделий.

Остаточными или предварительными или технологическими называют напряжения, существующие в конструкции или в отдельных ее элементах при отсутствии внешних силовых, тепловых и других воздействий. В технике для обозначения остаточных напряжений используют также названия технологических процессов, после которых они проявляются: сварочные напряжения, закалочные напряжения, деформационные, напряжения правки или отделки продукции. Остаточные (предварительные) напряжения играют значительную роль в природе и технике. Человек издавна научился пользоваться их полезными свойствами. Умелое применение внутреннего напряженно-



го состояния в материалах и конструкциях может дать большие выгоды их создателям.

К сожалению, отрицательную роль остаточные напряжения играют чаще, чем хотелось бы. В технике достаточно примеров разрушений, вызванных большими технологическими напряжениями. Одни из наиболее частых со значительными экологическими последствиями — это разрушения трубопроводов, в которых образуются трещины длиной иногда до нескольких десятков километров. Внезапные разрушения строительных конструкций, появление и развитие трещин на лобовых стеклах автомобилей, дорогостоящих заготовках крупногабаритных зеркал телескопов, хрустальной посуде, саморазрушение огнеупорных блоков для стенок стекловаренных печей, лежащих в спокойном состоянии на складе... Многие из нас могли бы продолжить этот перечень. В сущности, такие дорогостоящие разрушения и породили научное направление по изучению остаточных технологических напряжений и способов их регулирования [1].

Одной из причин Чернобыльской трагедии называют влияние остаточных напряжений в трубках тепловыделяющих элементов, выполненных из циркония, на работоспособность конструкции реактора. Утверждают, что завод-изготовитель внес изменение в процесс термомеханической обработки, не согласуя эти изменения с потребителем. В результате часть трубок разрушилась в процессе эксплуатации, вызвав утечку радиоактивного вещества и последующую аварию. Это обстоятельство говорит о важности и необходимости анализа ситуаций, возникающих в производстве и эксплуатации полуфабрикатов с наличием остаточных напряжений.

Чаще всего совершенствование технологии металлообработки предполагает борьбу с остаточными напряжениями. Однако они могут быть как опасными для эксплуатационных свойств изделий, так и являться весьма эффективным средством повышения многих характеристик металла. Наличие остаточных напряжений в изделиях может вызвать коробление, растрескивание из-за коррозии, хрупкое разрушение, понижение предела упругости материала, изменение предела усталости и т. д. Самопроизвольное коробление изделий наблюдается даже при продолжительном вылеживании их без применения. Растягивающие остаточные напряжения в поверхностных слоях особенно вредны для металлоизделий, работающих при знакопеременной нагрузке, так как такие напряжения способствуют усталостному разрушению (уста-

лостная трещина, как правило, зарождается на поверхности изделия). Вредное действие остаточных напряжений сказывается и в повышении общей химической активности металла. Особенно вредно усиление межкристаллитной коррозии под действием растягивающих остаточных напряжений (сезонное растрескивание латуни) [2].

В то же время в результате исследований [3] установлено, что благоприятное распределение остаточных напряжений в изделиях может повысить их вибрационную и усталостную прочность. Поверхность изделий, как правило, является наиболее «слабой» зоной, поэтому любая обработка, которая приводит к возникновению и росту поверхностных сжимающих напряжений, будет благоприятно сказываться на эксплуатационных свойствах изделий.

Следовательно, в разработке любой технологии производства металлоизделий усилия должны направляться не на борьбу с остаточными напряжениями, а на их оптимальное управление, т. е. на поиск таких распределений напряжений, которые гарантированно улучшают эксплуатационные свойства изделий. Без сомнения, такая оптимизация технологий трудна из-за многообразия причин порождения остаточных напряжений и сложности механизмов их измерения при неоднородных полях деформаций и температур, при фазовых превращениях и структурных перестройках металлов и сплавов [4].

В последнее время выполнено много исследований остаточных напряжений в металлах после механической, термической и химической обработок.

Однако данные о величине и распределении остаточных напряжений в металлопрокате и в металлоизделиях различного назначения, получаемых в условиях массового металлургического производства, почти отсутствуют, а имеющиеся примеры о наличии напряжений не увязаны с технологией производства и эксплуатационными свойствами [5].

# 1. Природа остаточных напряжений.

## Классификация

---

**В**первые на проявление остаточных напряжений в деформированном металле обратили внимание Биобер и Людерс в 1836 году [6]. Позднее Гартман продемонстрировал свой опыт: при растяжении или сжатии полированного образца на его поверхности появляется отчетливая игра света в виде сетки на волнующейся жидкости. В 1857 году было замечено, что в металле при определенных условиях литья и последующего остывания развиваются внутренние напряжения.

В России первым занялся исследованием остаточных напряжений в чугунах и сталях Н. В. Калакуцкий, который еще в позапрошлом веке отметил, что остаточные напряжения внешне проявляют себя через изменение геометрических размеров частей изделия при его разделении на части [7]. Внутреннее проявление остаточных напряжений связано с изменением межатомных расстояний, которое может быть обнаружено рентгеновскими методами.

Общим свойством остаточных напряжений является то, что они всегда бывают чисто упругими, даже если возникают в результате пластической деформации. Эти напряжения могут быть сняты или ослаблены способами, которые приводят к уменьшению упругих деформаций, соответствующих остаточным напряжениям, с последующим рассеиванием упругой потенциальной энергии, накопленной в материале. Но это может сопровождаться пластической деформацией и новыми остаточными напряжениями [6].

Анализируя рентгеновские данные об изменении межатомных расстояний, Н. Н. Давиденков предлагает разделить остаточные напряжения в изделиях на три рода [8]:

1. Напряжения первого рода, уравнивающиеся в пределах областей, размеры которых одного порядка с размерами тела (в макробиемах).

2. Напряжения второго рода, уравнивающиеся в объемах, размеры которых одного порядка с размерами зерен (в микрообъемах).

3. Напряжения третьего рода, уравнивающиеся в объемах одного порядка с размерами элементарной кристаллической ячейки (в субмикрообъеме).

Но вслед за этим в 1959 году Н. Н. Давиденков в работе [9] поставил под сомнение целесообразность такого подразделения напряжений и отказался от попытки классифицировать остаточные напряжения по их рентгеновским проявлениям, т. е. по тем признакам, по которым и определяются напряжения второго и третьего рода. Действительно, все еще нет работы, в которой была бы представлена, хотя бы схематически, модель равновесия выделенного элемента под действием остаточных напряжений второго или третьего рода или были использованы условия неразрывности деформации, или количественно связывались деформации с напряжениями.

Соглашаясь с Н. Н. Давиденковым в том, что классификационным признаком, однозначно определяющим вид остаточных напряжений, может быть только размер области, в пределах которой уравниваются напряжения, авторы [10] предложили термин «напряжение» заменить термином «искажение», особенно применительно к напряжениям второго и третьего родов.

Иногда рассматриваются напряжения, которые называют либо остаточными напряжениями 4-го рода, либо — безнагрузочными. Это те напряжения, которые являются следствием неравенства коэффициентов теплового расширения различных фаз и возникают в процессе охлаждения металлоизделий как после горячей, так и холодной деформации. Их справедливо было бы считать напряжениями 2-го рода, так как они уравниваются в объемах одного порядка с размерами зерен и отличаются от напряжения другого происхождения (закалка или наклеп) своей обратимостью [9].

Остаточные напряжения первого рода возникают под влиянием неоднородного охлаждения или нагрева, наклепа или фазовых и структурных превращений. Эти напряжения оказывают существенное влияние на поведение металла под воздействием внешних нагрузок и на многие его механические свойства.

Некоторые представления о возникновении напряжений второго рода можно получить из рассуждений Г. Ф. Косолапова [11]. Два кристалла поликристаллического образца, находящиеся рядом, всегда раз-

лично ориентированы по отношению друг к другу и к направлению действующих сил. При пластической деформации образца и после его разгрузки эти кристаллы из-за анизотропии будут иметь и различную остаточную деформацию. Так как между кристаллами существует взаимная связь, то один из них будет упруго растянут, а другой сжат. Следовательно, между ними возникнут внутренние напряжения, которые приведут к изменению межплоскостных расстояний в атомной решетке. Но деформация может быть неоднородной не только в отдельных кристаллах, но и в отдельных блоках и даже в различных участках одного и того же блока, если он упруго изогнут.

Физический механизм формирования остаточных напряжений 2-го рода и их влияние на деформирование поликристаллов подробно рассмотрен в работе [25].

При исследовании начальной стадии развития пластической деформации или изучении распределения деформации в случае неравномерного распределения напряжений (например, при изгибе, при кручении или при испытаниях надрезанных образцов) оказывается, что деформации распределяются в объеме металла весьма неравномерно. В поверхностных слоях металла при наличии значительного градиента напряжения часто можно наблюдать, что при одном и том же значении деформации в некоторых областях имеет место развившаяся пластическая деформация, тогда как в смежных областях материал еще находится в состоянии упругой деформации. Разница в местных значениях относительного удлинения или относительного сдвига может достигать значения одного порядка и больше [26].

Сосредоточение пластических деформаций зависит от наклона активных плоскостей скольжения по отношению к направлению максимального касательного напряжения  $\tau_{\max} = 1/2\sigma_{\max}$ .

Однако, если бы различие в величине деформаций объяснялось одной только разницей в ориентировке кристаллографических плоскостей, то точки возникновения первых пластических деформаций были бы произвольным образом распределены по поверхности образца, в котором во всех точках поверхности действует одинаковое максимальное макронапряжение  $\sigma_{\max}$ . Фактически это наблюдается только в начальной стадии процесса, когда возникают первые признаки пластической деформации.

В дальнейшем при развитии деформации образца наблюдается известная степень упрочнения зон пластической деформации, связан-

ная со взаимодействием расширяющихся зон деформации и распределением энергии в объеме образца. Это взаимодействие реализуется при проявлении внутренних напряжений второго рода, действующих в пределах отдельных зерен и их групп в окрестностях деформированной зоны. В соответствии с этим общая макродеформация рассматриваемого слоя металла выражается формулой

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{\text{пл}} i \delta + \varepsilon_{\text{упр}} (1 - i \delta),$$

где  $i$  — число зон пластичности на 1 см длины поверхности и  $\delta$  — размер этих зон в направлении действующего напряжения.

Механизм возникновения остаточных напряжений Немец А. анализирует по аналогии с системой из соединенных в одной точке стержней, нагруженных общей внешней нагрузкой [25]. Естественно, усилия растяжения в стержнях неодинаковы. С другой стороны, рассматриваемые три зоны, выделенные в объеме поликристаллического материала, работают при одном и том же напряжении, но имеют различное сопротивление пластической деформации. Стержни же изготовлены из одного материала и имеют одинаковый предел текучести.

Однако при рассмотрении внутренних напряжений, действующих в малых объемах порядка размера одного зерна, описанная модель достаточно правильно отражает соотношение сил, имеющее место в реальном материале. Средний стержень системы несет наибольшую нагрузку и в нем в первую очередь возникает пластическая деформация в то время, когда в остальных стержнях пока еще имеет место только упругая деформация.

После удаления внешней нагрузки боковые стержни стремятся сократиться до первоначальной длины и сжимают средний стержень. В то же время в боковых стержнях появляется растягивающее напряжение, играющее роль остаточного напряжения в системе. В сплошном теле, состоящем из зон с различным сопротивлением деформации, остаточные напряжения распределены аналогичным образом.

Напряжения от внешней нагрузки распределяются таким же образом, как остаточные напряжения, но имеют противоположный знак. Каждая расширяющая узкая зона пластической деформации противодействует пластической деформации в смежных зонах.



При увеличении внешней нагрузки описанная разница в значениях остаточных напряжений постепенно уменьшается, и при пластической деформации распределение напряжений становится более равномерным. При деформационном упрочнении твердость отдельных зерен или их групп увеличивается с одновременным увеличением сопротивления дальнейшей пластической деформации.

Таким образом, в начале пластической деформации распределение макронапряжений становится более равномерным, однако распределение деформаций становится очень неравномерным.

Приведенные выше рассуждения касались исследования остаточных напряжений второго рода. Направления этих напряжений определяются деформациями зерен или их групп. Баушингер исследовал поведение металлических образцов, нагружаемых сначала растягивающей, а затем сжимающей нагрузкой, и установил, что после изменения знака нагрузки предел упругости материала значительно понижается. Объяснение этого явления, называемого эффектом Баушингера, связывалось именно с анализом роли остаточных напряжений второго рода.

Возвращаясь к системе из трех стержней, можно заметить, что в среднем стержне, в котором имела место пластическая деформация растяжения, после удаления внешней нагрузки будет действовать остаточное напряжение сжатия. Если теперь приложить к системе нагрузку обратного знака, то сжимающее напряжение в среднем стержне от внешней нагрузки будет суммироваться с остаточным сжимающим напряжением, оставшимся после предыдущего цикла нагружения. Ввиду этого небольшая внешняя нагрузка, вызывающая наибольшие дополнительные напряжения, оказывается достаточной для появления в среднем стержне системы пластических макродеформаций.

Таким образом, при развитии пластической деформации в поликристаллическом металле возникает концентрация напряжений различных типов на границах зон, зерен и субзерен. После устранения внешней нагрузки появляются остаточные напряжения, которые в случае переменной нагрузки оказывают неблагоприятное влияние на сопротивление материала местной пластической деформации.

В общем случае приложения внешних нагрузок к поликристаллическому телу каждое из зерен испытывает неодинаковую деформацию и соответствующее упрочнение в различных зернах оказывается различным. После удаления внешней нагрузки в наиболее деформи-

рованных зернах возникают остаточные напряжения обратного знака (в данном случае — сжимающие).

Чем выше пластичность металла, тем меньше концентрация остаточных напряжений в различных зонах объема тела. Деформации зерен более однородны, и эффект Баушингера при больших деформациях менее заметен. Так, например, в аустенитной стали образование зон пластической деформации и их распространение в окружающий объем материала, находящегося в состоянии упругости, не проявляется так отчетливо.

По мнению Косолапова Г. Ф., напряжения третьего рода возникают при переходе атомов через потенциальные барьеры, т. е. при их перемещениях на расстояния, не менее половины межатомного расстояния [11]. Они нарушают кристаллическую структуру и ответственны за необратимый характер пластической деформации металлов, при которой внутренняя энергия повышается на величину:

$$\Delta U = \delta A - \delta Q,$$

где  $\delta A$  — работа внешних сил при деформировании,  $\delta Q$  — теплота, выделяющаяся в пластически деформированном теле.

Введенная Н. Н. Давиденковым классификация наиболее широко используется и в настоящее время.

Классификации, предложенные Е. Орованом и К. В. Мак-Грегором, являются менее полными и точными, так как согласно им остаточные напряжения подразделяются только на две группы: макро- и микронапряжения [12].

Основной причиной возникновения остаточных напряжений является неоднородность пластической деформации материала, которая возникает вследствие неоднородного по сечению холодного деформирования, неравномерного распределения температур при нагреве или охлаждении, неравномерности фазовых превращений в изделии.

Все технологические процессы обработки металлов давлением (ковка, штамповка, прокатка, волочение, прессование) сопровождаются неравномерной пластической деформацией по сечению. Одни слои металла растягиваются в большей степени, чем другие, и после разгрузки в них возникают остаточные напряжения сжатия, в других — в менее деформируемых слоях — возникают растягивающие остаточ-

ные напряжения. При горячей обработке давлением на неоднородное поле деформаций накладывается неравномерное температурное поле, возникающее при охлаждении изделий.

Неравномерное распределение температуры по сечению может приводить к неравномерному протеканию фазовых превращений в металле, что при различных удельных объемах ведет к возникновению высоких остаточных напряжений.

Таким образом, после горячей обработки металлов давлением возникает сложная система остаточных напряжений, величина и характер распределения которых определяются всеми перечисленными факторами.

Определить остаточные напряжения, возникающие в результате действия фазовых превращений, весьма сложно, так как они всегда связаны с наличием неравномерного температурного поля и, как следствие, температурных остаточных напряжений [5].

Механизмы возникновения и изменения остаточных напряжений в металлических телах наиболее подробно рассмотрены И. А. Биргером [7].

Образование остаточных напряжений при различных технологических процессах происходит различным образом. В основе их возникновения обычно лежат необратимые объемные изменения в материале.

Одним из наиболее типичных процессов является возникновение остаточных напряжений в результате предварительно пластической деформации. Часто эта деформация получается при нагревании или охлаждении тел.

С физической точки зрения образование остаточных напряжений после пластической деформации связано с необратимыми (остаточными) изменениями объема. Эти изменения объема, остающиеся после снятия нагрузки, и вызывают остаточные напряжения.

Например, в диске (см. рис. 1, а) при вращении с большой угловой скоростью возле отверстия напряжения превышают предел текучести и возникает остаточная деформация растяжения. После остановки все частицы диска стремятся вернуться на первоначальные окружности (свойства упругого материала) и в области отверстия возникают сжимающие остаточные напряжения (см. рис. 1, б).

В основе определения остаточных напряжений после пластических деформаций лежит теорема о разгрузке. В соответствии с этой теоремой, впервые указанной Генки, остаточные напряжения равны раз-

ности между истинными напряжениями в упругопластическом теле и теми напряжениями, которые создавались бы в нем при предположении об идеальной упругости материала.

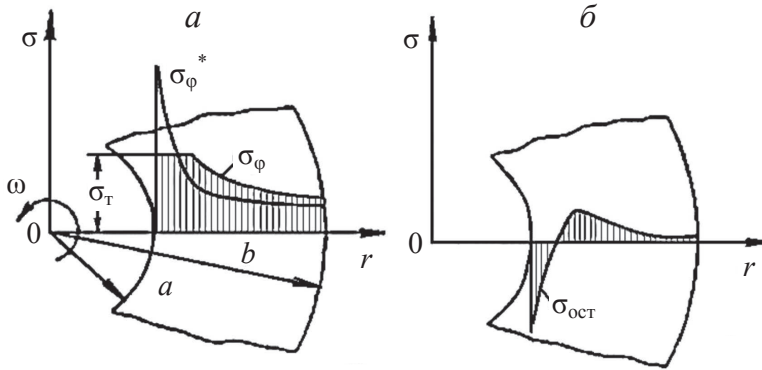


Рис. 1. Окружные остаточные напряжения после пластической деформации диска

Теорема о разгрузке основана на следующих соображениях [24]. Пусть к телу приложена система внешних сил и в нем возникли упругопластические деформации в процессе простого нагружения (напряжения в данной точке возрастают пропорционально одному параметру). После разгрузки можно представить процесс как нагружение усилиями противоположного направления. При этом нагружении тело ведет себя как упругое. Остаточные напряжения (после двух процессов нагружения — в прямом и обратном направлениях) будут равны разности между напряжениями в упругопластическом теле и в упругом теле при одних и тех же нагрузках. Теорема справедлива в том случае, если в процессе разгрузки не наступают повторные пластические деформации.

Из теоремы о разгрузке вытекает, что эпюра остаточных напряжений (для произвольного сечения) всегда является самоуравновешенной, т. е. равнодействующие силы и моменты равны нулю.

Необходимо также отметить, что если распределение напряжений в упругопластическом и в упругом теле одинаково (что имеет место в статически определимых системах), то остаточные напряжения после пластической деформации не возникают. В качестве примеров можно привести растяжение стержня осевой силой или растяжение тонкостенного цилиндра под действием внутреннего давления.

В некоторых процессах, например, при обработке роликами, преднамеренно создается неоднородная пластическая деформация для образования благоприятных остаточных напряжений.

Наконец, пластическая деформация возникает при значительных температурных напряжениях в случае интенсивного нагрева или охлаждения деталей, и в дальнейшем мы рассмотрим процесс образования остаточных напряжений после нагрева или охлаждения.

Основные особенности образования остаточных напряжений при нагревании или охлаждении выявляются на простом примере стержня, заделанного своими концами в абсолютно жесткие плоскости (рис. 2).

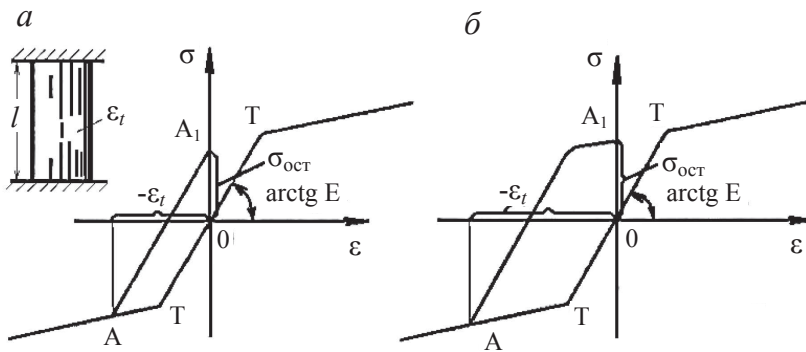


Рис. 2. Образование остаточных напряжений при нагреве стержня (механические свойства материала остаются постоянными в рассматриваемом интервале температур):

- a* — остаточные напряжения образуются при упругих деформациях;
- б* — остаточные напряжения образуются при наличии вторичных пластических деформаций

Расстояние между плоскостями остается неизменным. Эти плоскости (в идеализированном виде) отражают части конструкции, подвергающиеся температурному воздействию.

Если нагреть стержень на температуру  $t$ , то в нем возникнут температурные напряжения  $\sigma = -E\epsilon_t$ , где  $\epsilon_t$  — температурная деформация;  $\epsilon_t = \int \alpha^*(t_1) dt_1$ .

В последнем равенстве  $\alpha^*(t_1)$  — истинный коэффициент линейного расширения при температуре  $t_1$  ( $t_1$  — текущая температура,  $0 \leq t_1 \leq t$ ).

Если температурные напряжения в процессе нагрева будут выше предела текучести материала, то после снятия нагрева в стержне останутся остаточные напряжения.

На рис. 2 дан графический метод определения остаточных напряжений после нагрева при условии, что механические свойства в процессе нагрева остаются практически постоянными. По оси абсцисс откладывается значение температурной деформации, с обратным знаком точка  $A$  характеризует напряжение стержня в конце нагрева. При снятии нагрева деформации и напряжения изменяются по прямой  $AA_1$ ; отрезок  $0A_1$  выражает остаточные напряжения. При больших значениях  $\varepsilon_t$  (см. рис. 2, б) в процессе разгрузки образуются повторные пластические деформации.

Представляет интерес определение остаточных напряжений после значительного нагрева, когда в процессе нагрева и охлаждения механические свойства материала изменяются. Пусть нагрев осуществляется от  $t_1$  до  $t_k$ . На рис. 3 даны кривые деформирования для указанных температур и двух промежуточных.

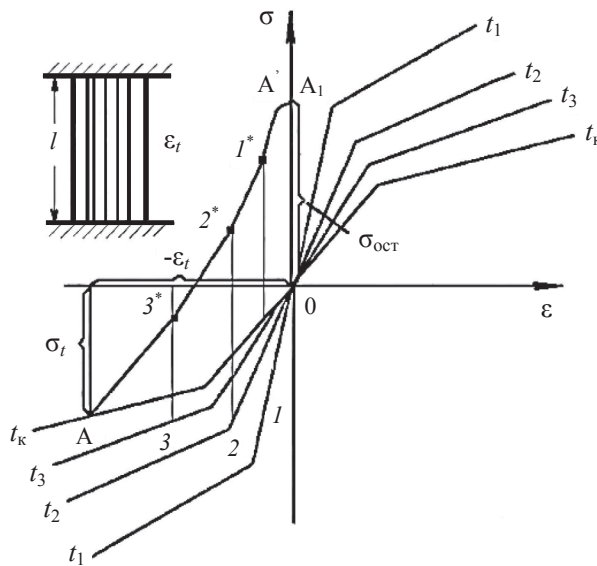


Рис. 3. Определение температурных напряжений в процессе нагрева с учетом изменения механических свойств материала

Вначале рост температурных напряжений идет вдоль кривой  $01$ , при дальнейшем повышении температуры осуществляется «перескок» на кривую  $02$  (предполагается, что свойства материала изменяются скачкообразно). Температурное напряжение после нагрева численно равно ординате точки  $A$ .



Рассматривается процесс охлаждения. При уменьшении температуры от  $t_k$  до  $t_3$  температурные напряжения будут уменьшаться по прямой АЗ\*, параллельной начальному участку кривой 0 А. При понижении температуры от  $t_3$  до  $t_2$  напряжения изменяются по прямой 3\*2\*, параллельной начальному участку кривой 03. В точке А' остаточные напряжения достигают предела текучести и дальнейший рост остаточных напряжений становится небольшим.

В изложенном методе определения остаточных напряжений используется простейшее предположение о том, что для каждого этапа нагрева или охлаждения справедлива зависимость  $\sigma = f(\varepsilon)$ , свойственная данной температуре, причем переход от одной кривой деформирования к другой осуществляется при постоянстве общей деформации.

Отметим важную особенность в образовании остаточных напряжений после интенсивного нагрева. В процессе нагрева создаются температурные напряжения сжатия, превосходящие предел текучести материала (температурная деформация, превышающая упругую). В результате в материале образуется остаточная пластическая деформация сжатия. После снятия нагрева размеры детали возвращаются к прежним, но наличие остаточной деформации сжатия вызывает появление остаточных напряжений растяжения.

Выше при рассмотрении вопроса об остаточных напряжениях после нагрева или охлаждения учитывалась только обобщенная «температурная» деформация.

Во многих случаях оказывается необходимым учесть специфические объемные изменения в материале, связанные с фазовыми и структурными превращениями, которые определяются не только температурой, но и другими параметрами процесса, например, временем. При расчете реальных процессов нагрева или охлаждения следует также иметь в виду, что распределение температур сильно изменяется во времени.

В некоторых случаях нагрева (или охлаждения) процессы нагружения и разгрузки (в данной точке) могут повторяться. Следует также учитывать изменение кривых деформирования в связи с изменением температуры. С подобными вопросами приходится сталкиваться при определении остаточных напряжений, вызванных термической обработкой металлов.

При термической обработке в поверхностных слоях детали возникают остаточные напряжения. Сжимающие остаточные напряжения

могут быть созданы путем быстрого охлаждения после нагрева до температуры ниже критической (например, при нагреве деталей из конструкционных сталей до 600 °С и охлаждения в воде) [13].

Экспериментальные исследования показали, что сжимающие остаточные напряжения после термической обработки повышают сопротивление усталости деталей без концентраторов напряжений на 10...30 % и на 50...80 % деталей с концентраторами напряжений.

При поверхностной закалке токами высокой частоты в поверхностных слоях обычно создаются сжимающие остаточные напряжения, повышающие сопротивление усталости деталей с концентрацией напряжений (на 70...200 % при наличии посадки с натягом).

В зонах обрыва закаленного слоя, например в галтелях валов, возникают остаточные напряжения растяжения, сопротивление усталости валов в этих местах снижается на 20...30 %. Эти зоны после поверхностной закалки необходимо упрочнять (роликом или дробью).

Сжимающие остаточные напряжения в поверхностных слоях деталей образуются при цементации, азотировании и цианировании. Если при шлифовании поверхностей после химико-термической обработки не возникают остаточные напряжения (обычно растягивающие), то сопротивление усталости деталей возрастает.

Обработка дробью поверхностей, подвергнутых химико-термической обработке и последующему шлифованию, оказывает благоприятное влияние на несущую способность деталей при переменных нагрузках, так как стабилизирует свойства поверхностных слоев деталей (устраняет некоторые дефекты и растягивающие напряжения от шлифования).

Остаточные напряжения в поверхностных слоях образуются и при нанесении гальванических покрытий. При никелировании возникают растягивающие остаточные напряжения, снижающие пределы выносливости деталей на 10...30 % (бóльшие значения относятся к сталям повышенной прочности). Несколько меньшее снижение прочности наблюдается в случае хромирования и меднения. При нанесении цинкового, кадмиевого и серебряного покрытий сопротивление усталости деталей не изменяется.

В результате локального нагрева и неравномерного расширения металла возникают сварочные напряжения и деформации при сварке. Напряжения в сварном изделии относятся к разряду внутренних собственных напряжений, так как существуют без приложения внешних

нагрузок. Причиной возникновения внутренних напряжений и деформаций при сварке являются также литейная усадка и вторичные структурные превращения в металле шва и в околошовной зоне. Литейная усадка, связанная с уменьшением объема металла при остывании и кристаллизации сварочной ванны, создает сжимающие силы в продольном и поперечном направлении. Влияние структурных изменений на рост внутренних напряжений особенно проявляется при сварке высокопрочных закаливающихся сплавов [14].

Напряжения и деформации можно разделить на временные (вызванные неравномерным нагревом в процессе сварки) и остаточные (сохранившиеся после полного остывания изделия). При разной толщине свариваемого металла наблюдаются поля остаточных напряжений трех типов: одноосное (на металле малых толщин), двухосное (на металле средних толщин) и трехосное (объемное), характерное для металла больших толщин.

По направлению действия остаточные напряжения разделяются на продольные (направлены параллельно оси шва) и поперечные (перпендикулярно оси шва). Для разных слоев металла сварного соединения они различаются как по величине, так и по знаку (растягивающие и сжимающие). Деформации сварной конструкции проявляются в виде продольного или поперечного (по отношению к оси шва) укорочения, а также изгиба, который связан с образованием угловых деформаций, что в свою очередь приводит к потере устойчивости.

Во всех случаях при осуществлении холодной, теплой и даже горячей пластической деформации металла после разгрузки возникают остаточные напряжения. Главными причинами их возникновения являются неоднородные распределения в объеме деформаций и температур. Обеспечить их однородность в реальных процессах ОМД практически невозможно. Даже в сравнительно простых схемах упругопластического деформирования, таких как плоская гибка в холодном состоянии, не удастся избежать появления достаточно больших остаточных напряжений. Например, в работе [15] описан механизм возникновения и определены величина и распределение остаточных напряжений по толщине листа при гибке. На рис. 4 показано распределение остаточных тангенциальных напряжений для случая гибки листовой заготовки толщиной 12 мм из Ст3 в обечайку с внутренним радиусом 640 мм.

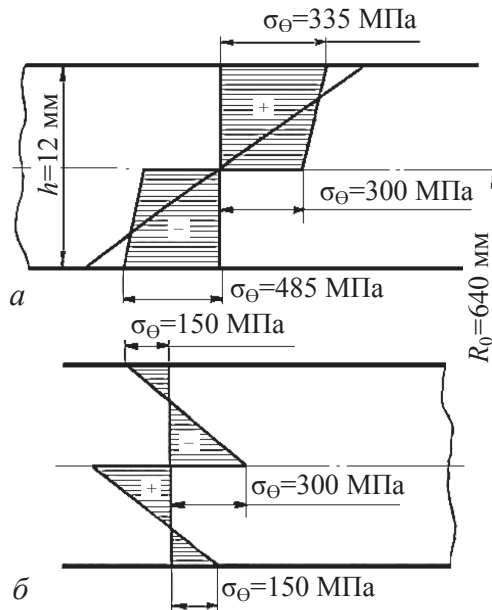


Рис. 4. Остаточные напряжения при вальцовке:

*a* — первоначальное распределение напряжений при действии изгибающего момента; *б* — характер распределения остаточных напряжений после упругой разгрузки

Аксиальные напряжения при этом имеют аналогичное распределение, но в два раза меньшую величину.

Аналогичен механизм формирования остаточных напряжений от изгибных деформаций труб при бухтовом волочении [16]. В условиях бухтового волочения при навивке трубы на барабан происходит дополнительная деформация, при которой возникает искажение формы поперечного сечения изделия. Величина овализации должна ограничиваться как с технологической точки зрения, так и по условиям нормативных документов на готовую продукцию. Если труба поставляется в нагартованном состоянии, то условия ее эксплуатации также зависят и от уровня остаточных напряжений.

Эпюры распределения напряжений в поперечном сечении изменяются в следующей последовательности. В момент выхода заднего конца трубы из матрицы исчезает напряжение волочения. Напряжения от изгиба, первоначально распределенные в сечении по некоторому закону, образуют внутренний результирующий момент, который производит разгибку трубы. Деформации от изгиба уменьшаются,

и при достижении некоторого значения устанавливается равновесие в сечении при большем значении диаметра бухты. На рис. 5 представлены картины распределения напряжений в поперечном сечении трубы, полученные моделированием, на разных стадиях процесса:

- в момент окончания процесса волочения;
- перед разгибкой трубы;
- после разгибки трубы.

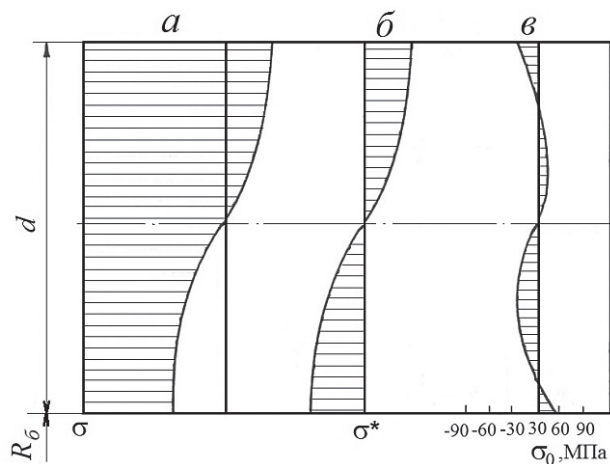


Рис. 5. Определение остаточных напряжений в сечении трубы после бухтового волочения:

- a* — момент окончания волочения; *б* — перед разгибкой трубы;  
*в* — эпюра остаточных напряжений

Эпюра остаточных напряжений может иметь численные значения, достигающие для больших диаметров труб до 40 % от величины сопротивления деформации. Последующая правка труб на правильных агрегатах может изменять картину распределения напряжений в поперечном сечении.

Остаточные напряжения в композиционных материалах являются следствием трех основных факторов, действующих в той или иной совокупности: неравномерной пластической деформации, в процессе их изготовления, различия коэффициентов термического расширения компонентов, внутренних структурных превращений. Если не учитывать возникающих в этих материалах остаточных напряжений, то могут сложиться неправильные представления о закономерностях упрочнения матрицы волокнами [17].

Опубликованные сведения по изучению остаточных напряжений в композиционных материалах весьма ограничены.

Как уже отмечалось, причинами возникновения внутренних макронапряжений (напряжений первого рода) являются неодинаковая пластическая деформация или разное изменение удельного объема в различных точках тела.

Следующий простой пример (рис. 6) поясняет возникновение остаточных напряжений при неодинаковой пластической деформации в разных участках металла [18].

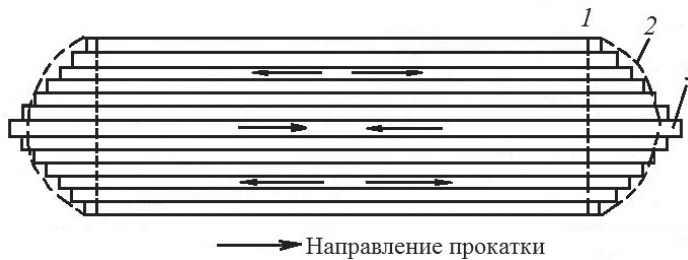


Рис. 6. Возникновение остаточных напряжений в полосе из-за разного обжатия центральных и крайних слоев при прокатке в бочкообразных валках:

1 — полоса до прокатки; 2 — полоса после прокатки; 3 — центральный слой полосы в случае свободной вытяжки (без взаимодействия с соседними слоями)

Представим себе, что полоса металла прокатывается в бочкообразных валках, диаметр которых посередине значительно больше, чем по концам. Центральные слои полосы получают большее обжатие, чем крайние. Если бы заготовка была составлена, например склеена из набора прутков, то каждый из этих прутков получил бы вытяжку в соответствии со своим обжатием: центральные прутки должны были бы вытянуться сильнее, чем крайние. Но полоса металла в действительности является монолитным телом, в котором центральные и крайние слои не могут изолированно один от других вытягиваться на разную длину. Поэтому центральные слои, которые стремятся сильнее вытянуться, будут испытывать сдерживающее влияние крайних слоев и окажутся недотянутыми. Иначе говоря, в центральных слоях возникнут сжимающие внутренние напряжения. Крайние слои, наоборот, будут под действием центральных слоев вытянуты на величину больше той, которая определяется их обжатием. Поэтому в крайних слоях возникнут растягивающие внутренние напряжения (рис. 6).



Напряжения разного знака взаимно уравниваются внутри полосы и сохраняются в металле после окончания прокатки.

Удельный объем меняется при термическом сжатии и расширении, кристаллизации расплава, фазовых превращениях в твердом состоянии и изменении химического состава поверхностных слоев. Если бы термическое расширение или сжатие, кристаллизация расплава и фазовые превращения в твердом состоянии проходили одновременно и в одинаковой степени по всему объему тела, то внутренние напряжения не возникали бы. Но при нагреве и охлаждении всегда имеется градиент температур по сечению тела, поэтому указанные выше изменения удельного объема в различных точках металла протекают неодинаково, в результате чего возникают внутренние напряжения.

Различают термические и фазовые (структурные) внутренние напряжения, которые возникают соответственно в результате термического сжатия или расширения и фазовых превращений в твердом состоянии при наличии в теле градиента температур. Внутренние напряжения могут возникнуть практически при любой обработке, причем одна технологическая операция может привести к созданию разных по своему происхождению остаточных напряжений: термических, фазовых и напряжений от неоднородной пластической деформации. Например, при горячей обработке давлением, кроме напряжений, образовавшихся из-за неоднородной пластической деформации, могут возникнуть термические, а также фазовые напряжения, если горячедеформированный сплав охлаждается ускоренно и в нем протекает фазовое превращение. При литье, сварке и закалке возникают термические и фазовые напряжения. Различные по своему происхождению остаточные напряжения алгебраически складываются и очень часто дают весьма сложные эпюры.

По мнению Биргера И. А., основной причиной возникновения остаточных напряжений в фасонных горячекатаных профилях является неравномерное охлаждение во время и после прокатки [7]. Например, при прокатке двутавровой балки тонкая стенка охлаждается быстрее и в ней возникают температурные напряжения растяжения, превосходящие сопротивление пластической деформации металла. Возникшая остаточная деформация растяжения приводит после охлаждения к остаточным напряжениям сжатия в стенке и растяжения в полках. Это зачастую приводит к прогибам и даже к разрушению уже прокатанных балок в процессе их охлаждения.

Значительные остаточные напряжения могут возникать после механической обработки (точения, фрезерования, шлифования и др.) [7].

Особенность этих остаточных напряжений состоит в том, что они действуют практически только в тонких поверхностных слоях. Однако, как показывает опыт эксплуатации, остаточные напряжения в поверхностном слое могут повлиять на прочность всей детали, особенно при действии переменных напряжений.

Основными факторами, вызывающими возникновение остаточных напряжений, являются нагревание поверхностных слоев и пластическая деформация при силовом воздействии.

Выделение тепла в процессе резания (вследствие работы деформации и трения) приводит к большим температурным градиентам материала. Возникшая пластическая деформация сжатия после установления нормальной температуры в детали вызывает появление растягивающих остаточных напряжений. В некоторых случаях, кроме чисто температурных деформаций, следует учесть структурные изменения и вызванные ими изменения объема.

Таким образом, два основных фактора при резании — силовой и температурный — действуют в противоположные стороны, что и объясняет существенную зависимость величины и знака остаточных напряжений от технологического режима обработки.

Остаточные напряжения при точении зависят от скорости резания и подачи, величины переднего угла резца, затупления резца, условий охлаждения; они зависят, конечно, и от механических свойств обрабатываемого материала.

Остаточные напряжения достигают величины 200...800 МПа (как сжимающие, так и растягивающие) и залегают на глубине 50...100 мк.

При точении углеродистой стали с положительным передним углом резца на высоких скоростях резания в поверхностных слоях образуются остаточные напряжения растяжения. При тех же условиях резания в стали 18ХНМА образуются напряжения сжатия.

Созданию остаточных напряжений растяжения в поверхностных слоях способствует затупление резца.

Подогрев детали уменьшил температурные напряжения, что привело к переходу растягивающих остаточных напряжений в сжимающие. В процессе шлифования решающее влияние на образование остаточных напряжений оказывает тепловой фактор.

В поверхностном слое в процессе шлифования возникают сжимающие температурные напряжения. Указанные напряжения превосходят предел текучести материала и вызывают пластическую деформацию сжатия. После окончания процесса шлифования и установления нормальной температуры эта деформация сохраняется, что приводит к растяжению поверхностного слоя со стороны внутренних слоев, т. е. к образованию в нем растягивающих остаточных напряжений.

Силовая пластическая деформация, связанная с усилением резания, при шлифовании имеет второстепенное значение.

На основании ряда экспериментальных исследований можно считать, что после шлифования в поверхностных слоях возникают растягивающие остаточные напряжения 400...800 МПа (на глубине 20...50 мк) [7].

При ленточном шлифовании жаропрочных сплавов в поверхностных слоях создаются сжимающие остаточные напряжения порядка 400...500 МПа, при ручном полировании 400...600 МПа.

Для снятия остаточных напряжений в жаропрочных сплавах применяется специальный отжиг.

В последнее время, особенно для жаропрочных сплавов, при окончательной обработке электрополированием все шире применяется электроэрозионная и электрогидравлическая обработка.

Как уже указывалось, в различных областях техники используются специальные технологические процессы, направленные на создание благоприятного распределения остаточных напряжений (например, сжимающих остаточных напряжений в поверхностных слоях). К числу таких процессов может быть отнесена обдувка дробью, накатка роликами, чеканка и другая поверхностная упрочняющая обработка.

При оценке наибольшей возможной величины остаточных напряжений исходят из того, что они возникают в результате необратимых объемных изменений [7]. Если имеется одноосное напряженное состояние, то наибольшее остаточное напряжение

$$\sigma_{\text{ост}} \leq \sigma_{\text{т}}, \quad (1)$$

так как деформация не может вызвать напряжения больше предела текучести.

Следует отметить, что значение  $\sigma_{\text{т}}$  в равенстве (1) соответствует окончательной температуре детали. Если материал детали подвергал-

ся значительной пластической деформации (нагартовке), то величина  $\sigma_T$  может быть значительно выше исходной.

При двухосном напряженном состоянии условие для главных остаточных напряжений имеет следующий вид:

$$\sqrt{\sigma_{1ост}^2 - \sigma_{1ост}\sigma_{2ост} + \sigma_{2ост}^2} \leq \sigma_T. \quad (2)$$

Из этого условия следует, что остаточные напряжения не могут превышать  $1,15 \sigma_1$ , т. е.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{1ост} &< 1,15\sigma_T; \\ \sigma_{2ост} &< 1,15\sigma_T. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

В поверхностном слое детали, где в общем случае напряженное состояние может быть двухосным, наибольшие остаточные напряжения ограничены условиями (3). Это важно отметить, так как в некоторых работах вычисляются остаточные напряжения, превышающие даже предел прочности материала; такие значения следует отнести к погрешностям эксперимента или метода вычисления.

При трехосном напряженном состоянии (общий случай напряженного состояния) условие ограничения остаточных напряжений таково:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{1ост} - \sigma_{2ост})^2 + (\sigma_{2ост} - \sigma_{3ост})^2 + (\sigma_{3ост} - \sigma_{1ост})^2} \leq \sigma_T.$$

Обычно наибольшие остаточные напряжения лежат в поверхностных слоях, где напряженное состояние близко к двухосному. Тогда можно считать, что наибольшие остаточные напряжения

$$\sigma_{ост} < 1,15\sigma_T. \quad (4)$$

Во многих случаях для увеличения надежности и долговечности детали необходимо уменьшить остаточные напряжения в ней. Тогда условие (4) может служить одним из обоснований для широко распространенной технологической операции для снятия остаточных напряжений — операции отжига.

Однако выбор температуры отжига или отпуска для снятия остаточных напряжений по пределу текучести является условным, так как не учитывается происходящий в материале процесс ползучести.

Более правильно считать, что величина остаточных напряжений ограничивается пределом ползучести (за время выдержки  $\tau$ )

$$\sigma_{\text{ост}} < 1,15 \sigma_{0,2/\tau}. \quad (5)$$

В этом равенстве предел ползучести  $\sigma_{0,2/\tau}$  представляет собой напряжение, вызывающее остаточную деформацию 0,2 % за время  $\tau$  (при заданной температуре выдержки).

Следует отметить, что условие (5) является достаточным, но не необходимым. В ряде случаев остаточные напряжения могут быть снижены за счет объемных изменений при структурных превращениях в процессе отжига [7].

В металлоизделиях после завершения всего цикла обработки под воздействием механических и тепловых нагрузок наблюдается ползучесть, в результате которой происходит процесс релаксации (уменьшения) остаточных напряжений. Этот процесс протекает интенсивно при повышенных температурах, но в некоторых случаях он происходит и при нормальной температуре.

Отметим следующее важное обстоятельство. Изменение напряженного состояния тела (например, вследствие релаксации остаточных напряжений) приводит к появлению деформаций и перемещений. С этим связано возможное коробление деталей в процессе отжига, в процессе эксплуатации или даже хранения.

Иногда релаксация напряжений приводит к неблагоприятному перераспределению остаточных напряжений, что при некоторых условиях может вызвать внезапное хрупкое разрушение. Известны случаи разрушения или появления трещин в процессе хранения деталей.

## 2. Влияние остаточных напряжений на эксплуатационные свойства металлоизделий

---

Остаточные напряжения сказываются на поведении изделия при обработке, эксплуатации и даже при хранении на складе [2].

Остаточные напряжения, алгебраически складываясь с рабочими, извне приложенными напряжениями, могут их усиливать или ослаблять. Как правило, наиболее опасны растягивающие остаточные напряжения, так как они, складываясь с растягивающими напряжениями от внешних нагрузок, приводят к разрушению, хотя эти нагрузки могут быть и невелики.

Особенно опасны растягивающие напряжения при трехосном растяжении. Как известно, напряженное состояние при трехосном растяжении наиболее «жесткое», так как касательные напряжения, вызывающие пластическое течение, чрезвычайно малы или равны нулю, вследствие чего создаются благоприятные условия для хрупкого разрушения. Остаточные напряжения особенно опасны также в изделиях из малопластичных сплавов и в таких, которые становятся хрупкими при понижении температуры.

При больших остаточных напряжениях разрушение часто происходит от незначительных по величине нагрузок (особенно ударных). Так, например, трещины в стальных отливках могут возникать при очистке их пневматическим молотком и даже от сквозняка зимой (из-за добавления термических напряжений к остаточным). Крупные слитки полунепрерывного литья из малопластичных алюминиевых сплавов через некоторое время после окончания литья могут разрушаться от случайных небольших сотрясений или ударов; освобождающаяся при разрушении упругая энергия так велика, что одна часть слитка весом в сотни килограммов с сильным треском отрывается и отлетает на расстояние в несколько метров.

Остаточные растягивающие напряжения в сварных конструкциях иногда приводят к серьезным авариям. Разрушения сварных мостов и цельносварных судов часто связаны с проявлением больших остаточных напряжений, близких к разрушающим. Известны случаи, когда цельносварные суда из-за остаточных растягивающих напряжений разрушались под воздействием незначительных внешних факторов, например от удара ломом при очистке палубы ото льда.

Растягивающие остаточные напряжения в поверхностных слоях особенно вредны для деталей, работающих при знакопеременной нагрузке, так как такие напряжения способствуют усталостному разрушению.

Вредное действие остаточных напряжений сказывается в повышении общей химической активности металла. Особенно вредно усиление межкристаллитной коррозии под действием растягивающих остаточных напряжений (сезонное растрескивание латуней).

В металле с остаточными напряжениями существуют области упругих деформаций разного знака. Если разрезать изделие или срезать (а также стравить) с него поверхностный слой, то становится возможным упругое снятие макронапряжений. На измерении возникающих при этом упругих деформаций основаны механические методы определения величины и знака остаточных напряжений (напряжения вычисляются по деформациям).

Остаточные напряжения могут вызвать искажение формы (коробление) и изменение размеров изделия во время его обработки, эксплуатации или хранения на складе. Коробление металлоизделий появляется в результате изгибающей и скручивающей деформации, возникающей в металле при нарушении равновесия внутренних сил и моментов. Особенно частые и сильные коробления появляются при обработке резанием, так как удаление слоя металла нарушает равновесие остаточных напряжений.

Самопроизвольные изменения размеров и коробление при хранении деталей происходят из-за постепенного перераспределения остаточных напряжений при их релаксации. Скорость релаксации (уменьшения) напряжений зависит от их исходного уровня: чем он выше, тем быстрее идет релаксация. Так как в разных участках сечения изделия величина остаточных напряжений различна, то из-за неодинаковой скорости их релаксации при комнатной температуре нарушается исходное равновесие внутренних сил и моментов. При этом остаточные



напряжения перераспределяются, устанавливается новое состояние равновесия. Величина коробления тем больше, чем больше различие в степени релаксации остаточных напряжений в разных участках сечения и чем меньше жесткость изделия при изгибе. Иногда после сборки станков появляются недопустимые зазоры или натяги в сопряженных деталях, ранее точно пригнанных одна к другой.

Создавая контролируемые остаточные напряжения, которые вычитаются из рабочих напряжений, можно повысить эксплуатационные свойства металла. Чаще всего в поверхностном слое намеренно создают сжимающие остаточные напряжения, которые уменьшают опасные растягивающие рабочие напряжения. С этой целью применяют дробеструйный наклеп, азотирование и другие виды поверхностной обработки металлов.

На основании экспериментальных исследований и практического опыта устанавливается, что сжимающие остаточные напряжения повышают усталостную прочность, тогда как растягивающие остаточные напряжения действуют неблагоприятно.

Влияние остаточных напряжений на выносливость зависит от механических свойств материала и от характера напряженного состояния. При значительных сжимающих напряжениях в поверхностном слое увеличение усталостной прочности проявляется в большей степени для менее пластичных материалов и при концентрации напряжений.

При резком изменении величины и знака остаточных напряжений в поверхностных слоях, что свойственно некоторым видам механической обработки, фактором, определяющим обычно усталостную прочность детали, являются остаточные напряжения в поверхностном слое глубиной 10...20 мк.

Следует также иметь в виду, что влияние остаточных напряжений на выносливость может не проявиться, если в процессе нагружения имелось хотя бы несколько циклов повышения напряжений, при которых возникают пластические деформации, снимающие остаточные напряжения [7].

В ряде случаев, особенно при сварке высокопрочных или трудно свариваемых материалов в однородном или разнородном сочетании, сварочные напряжения оказывают отрицательное влияние на конечные свойства соединений. Они так же, как ухудшение структуры и потеря пластичности шва и околошовной зоны, приводят к возникновению трещин, а при наличии и других неблагоприятных факторов

(низкие температуры, концентраторы напряжений) — к хрупкому разрушению конструкции. Дефекты швов (поры, шлаковые включения и др.) служат концентраторами напряжений. Они усиливают вредное влияние остаточных напряжений, особенно при знакопеременных нагрузках. Остаточные напряжения могут понизить жесткость конструкции, а также оказать существенное влияние на замедленное разрушение даже при отсутствии рабочих нагрузок (например, при гидридных превращениях в сварных соединениях из сплавов на основе титана и циркония). При наличии остаточных напряжений может понизиться коррозионная стойкость сварных соединений (например, на сплаве ОТ4 и др.) [14].

Поверхностные растягивающие остаточные напряжения рассматриваются как существенный фактор развития межкристаллитной коррозии, например в коррозионно-стойких сталях, и коррозионного растрескивания латуней.

В работах [19, 20] явление растрескивания латуней рассмотрено достаточно подробно. При испытании латуни на растрескивание в искусственных лабораторных средах или под открытым небом трещины всегда начинались на тех участках поверхности, где действовали растягивающие напряжения. Наоборот, участки с напряжениями сжатия были стойки к растрескиванию. Следовательно, для образования трещин при коррозионном растрескивании латуни необходимы растягивающие напряжения первого рода на поверхности изделий.

Увеличение растягивающих напряжений приводит к сокращению времени испытаний до образования трещин в латунных образцах или до их разрушения.

Впервые этот факт установлен и опубликован в 1880 г. А. В. Рутковским, который, испытав на растрескивание несколько сотен гильз на открытом воздухе, установил, что «порча происходит в тех гильзах, в которых остались вредные натяжения в металле», и что «порча тем значительнее, чем натяжение больше».

Проведенные опыты подтвердили уменьшение продолжительности испытания с ростом растягивающего напряжения. Отожженные полоски латуни под действием приложенного усилия, вызывающего в начальный момент испытания растягивающего напряжения 80 МПа, разрушились в 11 раз быстрее, чем при 20 МПа. На рис. 7 приведена зависимость коэффициента склонности латуни к растягиванию от растягивающего напряжения. Испытывались отожженные латунные

полоски, помещенные в насыщенный раствор  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  в 10 %-ном  $\text{NH}_3$  и подвергнутые растяжению.

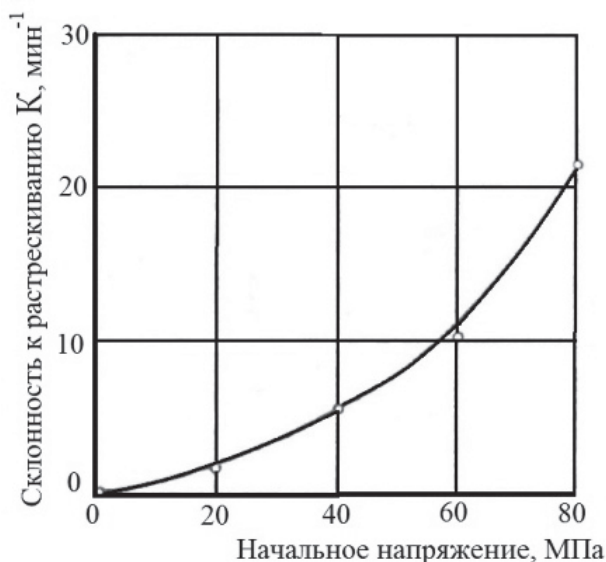


Рис. 7. Склонность к растрескиванию латуни в зависимости от величины растягивающего напряжения

На рис. 7 в качестве критерия склонности латуни к растрескиванию использована величина  $K$ , обратная длительности испытания. Эта величина, названная коэффициентом склонности к растрескиванию, определяется делением 100 на длительность испытания (в минутах) до появления первых трещин на поверхности образцов. Бобылев А. В. делает вывод, что растрескивание латуни в отсутствие растягивающих напряжений невозможно [20]. Даже при внимательном рассмотрении случаев «растрескивания латуни без воздействия растягивающих напряжений» оказывалось, что такое воздействие все же было. Так, например, растрескивание латунной ленты, подвергнутой полному рекристаллизованному отжигу и последующему хранению ее рулонов в неблагоприятных условиях, было вызвано тем, что ее отжигали в протяжных печах и, при свертке в ней возникли напряжения. По той же причине оказывались склонными к растрескиванию кольца, свернутые из отоженных латунных полосок. Растрескивание латунной проволоки, которую отжигали в бухтах, произошло от того, что бухты хранились при горизонтальном положении их осей в сарае,

не защищенном от дождя, и под собственным весом в рулоне возникали растягивающие напряжения.

Склонность к растрескиванию в поперечном к деформации направлении выше, чем в продольном: поперечные полоски из холоднокатаной латуни менее стойки, чем продольные.

Очень большую опасность представляет сопряжение латунных деталей или изделий с другими деталями «с натягом» для надежного соединения, так как это приводит к возникновению растягивающих напряжений, например, в дульцах патронированных гильз или в латунных «выводах» электросопротивлений.

Растягивающие напряжения возникают и при использовании латунных полуфабрикатом (трубок, полос, проволоки) в качестве пружин и упругих чувствительных элементов.

Эффективное управление уровнем и распределением остаточных напряжений в металлоизделиях является актуальной проблемой при изготовлении труб и проволоки из коррозионно-стойких сталей аустенитного класса, стойких против межкристаллитной коррозии (МКК).

Как известно, наибольший эффект повышения устойчивости против точечной и межкристаллитной коррозии после горячей деформации в цикле ВТМО наблюдается в сталях с 0,05 % С, выплавленной из первородной шихты [27].

Сопоставление результатов, полученных разными методами, приводит к следующему выводу. При выплавке аустенитных хромоникелевых сталей из шихты высокой чистоты для повышения стойкости против МКК необходимо снижать содержание углерода. Если прибегнуть к более дешевому способу производства нержавеющей хромоникелевой сталей — выплавке из обычной шихты, то такого же повышения стойкости против МКК можно достичь, применяя регламентированную горячую деформацию стали в цикле ВТМО.

Эффекта уменьшения склонности стали к МКК при использовании ВТМО стали обычной чистоты по примесям можно добиться и при повышенном до 0,1 % содержании углерода, что, во-первых, облегчает производство сталей этого класса и, во-вторых, определяет более высокий уровень их прочности.

Стойкость аустенитных сталей против коррозионного растрескивания под напряжением исследовали в кипящем 42 %-ном растворе  $\text{MgCl}_2$  ( $t_{\text{кип}} = 154^\circ\text{C}$ ) на установке ИНК-1 [27]. Испытания проводили по схеме одноосного растяжения образцов ЛИМ-4 В и приложении

постоянной нагрузки. Размер напряжения определяли по результатам предварительных испытаний на растяжение при комнатной температуре, причем  $\sigma_0$  составляло определенную долю от  $\sigma_{0,2}$ . Нагрузку задавали с точностью  $\pm 10$  Н. Фиксировали время до разрушения  $\tau_p$ ; за характеристику стойкости против коррозионного растрескивания под напряжением принимали среднее значение  $\tau_p$  для трех образцов после данной обработки с учетом среднеквадратичного отклонения. Так, время до разрушения при испытаниях на коррозионное растрескивание под напряжением (КРН) термомеханически упрочненной стали X18 H12 T (ВТМО:  $t_{\text{деф}} = 900^\circ\text{C}$ ,  $\dot{\epsilon} = 5 \text{ c}^{-1}$ ,  $\epsilon = 60\%$ ), выплавленной из обычной шихты с содержанием углерода 0,1 % в случае приложения напряжения, равного 264 МПа ( $0,7 \sigma_{0,2}$ ), увеличилось в 2,5 раза по сравнению с обычно закаленным состоянием (264 МПа составляет  $1,2 \sigma_{0,2}$  для закаленной стали).

При уровне прикладываемого напряжения, например, до  $1,2 \sigma_{0,2}$  ( $\sigma = 450$  МПа), такого повышения сопротивления КРН не наблюдалось. Время до разрушения горячедеформированной стали оказалось меньше, чем закаленной. Это происходит потому, что при напряжении  $1,2 \sigma_{0,2}$  развиваются процессы пластического течения, приводящие к разрушению ранее созданной при ВТМО субструктуры, определяющей механические свойства стали.

Следовательно, сопротивление КРН следует рассматривать в совокупности с другими механическими свойствами, в частности, с характеристиками сопротивления деформации.

Сопоставление результатов исследования сопротивления коррозионному растрескиванию под напряжением закаленной и горячедеформированной стали X18 H12 T представлено графически на рис. 8.

Действие постоянно приложенных напряжений является одним из основных факторов, определяющих транскристаллитное разрушение при коррозионном растрескивании аустенитных хромоникелевых сталей. На стадии зарождения трещин напряжения определяют уровень локальной пластической деформации и одновременно локальное разрушение защитной пленки на поверхности образца. Распространение же коррозионной трещины связано с процессами пластической релаксации перед ее вершиной. В общем случае, с увеличением уровня напряжений и при одновременном действии агрессивной среды, увеличивается число активных центров, способствующих возникновению и развитию коррозионных трещин на поверхности металла. С ка-

кой интенсивностью возникающая трещина будет распространяться в глубь зерна, определяется протеканием пластической релаксации в примыкающем к ее вершине объеме.

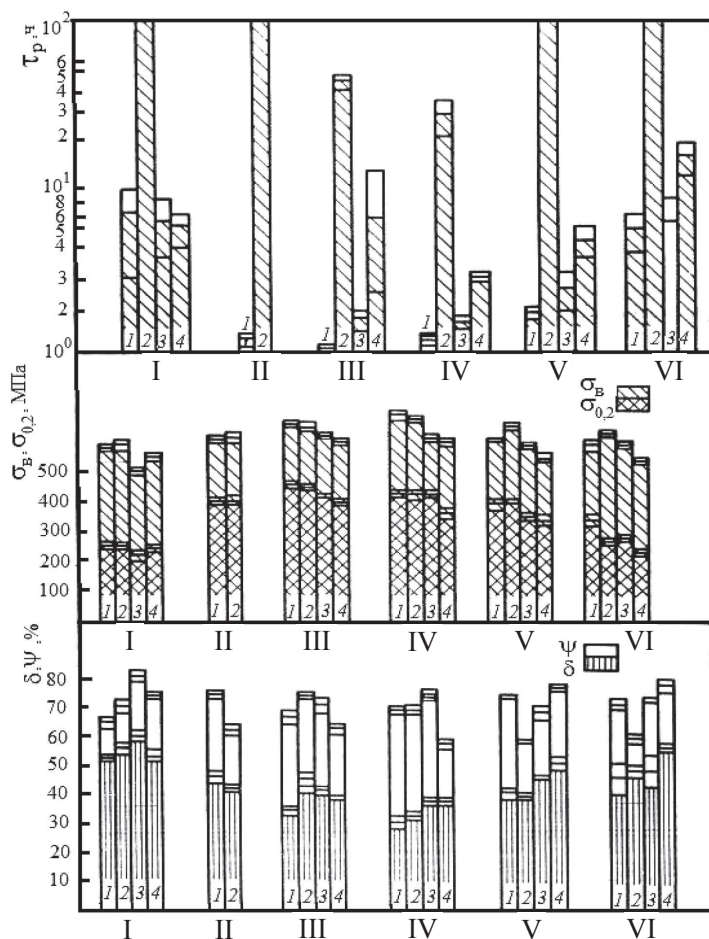


Рис. 8. Сопротивление коррозионному растрескиванию под напряжением закаленной и горячедеформированной стали X18 H12 T:

*I* — стандартная закалка 1060 °С, 1 ч, охлаждение в воде; *II* — ВТМО:  $t_{\text{деф}} = 900$  °С,  $\dot{\varepsilon} = 5 \text{ с}^{-1}$ ,  $\varepsilon = 20$  %; *III* — ВТМО:  $t_{\text{деф}} = 900$  °С,  $\dot{\varepsilon} = 5 \text{ с}^{-1}$ ,  $\varepsilon = 60$  %; *IV* — ВТМО: подстуживание с 1115 °С до  $t_{\text{деф}} = 900$  °С,  $\dot{\varepsilon} = 5 \text{ с}^{-1}$ ,  $\varepsilon = 60$  %; *V* — ВТМО:  $t_{\text{деф}} = 1050$  °С,  $\dot{\varepsilon} = 5 \text{ с}^{-1}$ ,  $\varepsilon = 60$  %; *VI* — ВТМО:  $t_{\text{деф}} = 1050$  °С,  $\dot{\varepsilon} = 5 \text{ с}^{-1}$ ,  $\varepsilon = 60$  %

На основании проведенных исследований авторы [27] делают вывод, что стойкость аустенитных хромоникелевых сталей против коррозионного растрескивания под напряжением определяется благо-



приятным сочетанием прочности и пластичности. Коррозионное растрескивание под напряжением для данной агрессивной среды является, таким образом, характеристикой больше механических, чем коррозионных свойств стали.

Влияние наличия, величины и распределения остаточных напряжений на качество стальных труб подробно изучено авторами Соколовым И. А. и Уральским В. Н. [5]. Показано, какое место учет и управление остаточными напряжениями занимают в общей структуре формирования качества металлоизделий.

Качество металлопродукции в целом (нулевой уровень) характеризуется механическими свойствами, качеством наружной поверхности и размерами проката (первый уровень).

Наибольшее количество свойств включает качество металла, которое обычно характеризуется химическим составом, механическими свойствами, структурой и внутренними дефектами, иногда дополнительно оговариваются специальные свойства (второй уровень). В свою очередь каждое это свойство можно разложить на отдельные простые показатели качества, которые будут количественно характеризовать свойства.

О появлении остаточных напряжений в металле после различных процессов пластической или термической обработки известно давно, однако в показателях качества остаточные напряжения отражения не нашли. В последнее время в ряде зарубежных рекламных описаний и проспектов на фасонные профили высокой точности и другие изделия, получаемые методами холодной пластической деформации, содержатся указания о наличии «гарантированного уровня остаточных напряжений».

Но в большинстве случаев при общей оценке качества отдельных видов металлопродукции или особенностей нового процесса ограничиваются общим указанием о «благоприятном» или «неблагоприятном» распределении или о наличии сжимающих или растягивающих остаточных напряжений. Причины кроются в отсутствии оперативных методов точного замера остаточных напряжений, количественной оценке их влияния на эксплуатационные свойства. Соответственно в металлургии очень мало данных о влиянии различных технологических параметров на величину остаточных напряжений. Из-за отсутствия четкой количественной оценки такого свойства металлопродукции, как наличия в ней определенных остаточных напряжений, до настоящего времени нет показателей качества по остаточным напряжениям. Эти напряжения



нельзя отнести к таким простым единичным показателям качества, как пределы прочности и текучести, относительные удлинения и сужение, твердость, коррозионная стойкость и др. Нельзя приравнять остаточные напряжения к более общим показателям «первого уровня», таким как размеры профиля или качество металла. Под действием растягивающих напряжений микродефекты могут развиваться в макротрещины.

Экстремальными являются случаи разрушения прутков и профилей, изготовленных из легированных марок сталей без последующей термической обработки. Причиной разрушения является то, что первоначально высокий уровень остаточных напряжений при перераспределении их во времени может вызвать в отдельных элементах изделия напряжения, которые превысят предел прочности. Отмеченные явления были известны и раньше, но их анализ с точки зрения последних представлений о качестве металлопродукции позволяет отнести остаточные напряжения к одному из наиболее важных свойств, входящих в состав самого общего показателя качества.

В работах [12, 5] рассмотрены факторы, вызывающие разрушение металлопродукции, в частности труб, как в процессе изготовления, так и при хранении, транспортировке и машиностроительном использовании, среди которых остаточные напряжения играют далеко не последнюю роль.

Различают следующие виды разрушений материалов: вязкое, хрупкое, усталостное и коррозионное под напряжением. В том случае, если материал является упругим, то справедлив принцип суперпозиции, т. е. остаточные напряжения складываются алгебраически с напряжениями от внешней нагрузки. Если в результате нагрузки наступает пластическое состояние материала, то в условиях пластического течения остаточные напряжения не могут алгебраически складываться с напряжениями нагрузки, т. к. происходит их количественное изменение и перераспределение. В итоге после разгрузки в теле возникает совершенно иное распределение остаточных напряжений, соответствующее системе внешних сил, вызвавших пластическое течение. Коттрелл и ряд других исследователей [5] считают, что даже небольшой пластической деформации (до 0,2 %) достаточно, чтобы снять существующие остаточные напряжения.

Таким образом, когда до разрушения наблюдается макроскопическое пластическое течение, остаточные напряжения мало или вообще не влияют на процесс вязкого разрушения.

В тех же случаях, когда пластическая деформация в силу ряда причин (старение, исчерпание пластичности, низкие температуры и т. д.) затруднена или невозможна, остаточные напряжения существенно влияют на процесс разрушения.

Металл с остаточными напряжениями первого рода является телом, деформируемым с нулевой скоростью при длительной нагрузке. Ввиду понижения сопротивления деформации при длительной нагрузке величина и схема распределения остаточных напряжений в отдельных элементах объема тела могут оказаться неблагоприятными, и произойдет разрушение.

В книге [5] на фотографиях представлены некоторые образцы труб после безоправочного волочения, разрушившиеся от действия остаточных напряжений. Для сталей 20 и 20 А характер разрушения — трещина по образующей вдоль трубы — одинаков, что указывает на действие тангенциальных остаточных напряжений. Для сталей с повышенным содержанием углерода и легированных (стали 35, 30ХГСА, 30ХГСНА) характер разрушения самый разнообразный: имеются и винтовые трещины, и синусоидальные. Очевидно, в этих случаях проявляется совместное действие растягивающих тангенциальных и продольных напряжений. Опасность высоких растягивающих напряжений заключается еще и в том, что они могут способствовать образованию в металле микротрещин, которые не залечиваются при дальнейшей термической обработке и приводят к его разрушению. Примером могут служить бурильные трубы, разрушившиеся при эксплуатации. Трубы из стали 36 Г2 С изготавливали безоправочным волочением с  $57 \times 5,35$  до  $42 \times 5,0$  мм. После этого их отжигали, правили на косовалковой правильной машине, нормализовали и правили на кулачковом прессе. Очевидно, перед отжигом в трубах уже были трещины от воздействия остаточных напряжений, которые при отжиге не залечивались [21].

Разрушающее действие остаточных напряжений проявляется и после процессов прокатки, когда неравномерное охлаждение является причиной возникновения температурных остаточных напряжений. Кампью приводит ряд примеров разрушения прокатных балок от действия остаточных напряжений [12].

Многочисленные случаи внезапных разрушений конструкции и деталей послужили толчком к выбору критериев, позволяющих дать количественную оценку склонности металлов к хрупкому разрушению.

Эффективный критерий должен позволять оценивать сопротивление материалов возникновению разрушения при достаточно развитых пластических зонах. Это имеет особое значение при наличии в конструкционных элементах полей остаточных напряжений, возникающих в результате тех или иных технологических операций. В тех случаях, когда растягивающие остаточные напряжения близки к пределу текучести материала, даже при низких уровнях приложенных нагрузок в окрестностях дефекта появляются развитые пластические зоны. В связи с этим возникает необходимость в анализе влияния остаточных напряжений на условия инициирования хрупкого разрушения в зависимости от их величин, свойств материала и размеров исходных дефектов. На вероятность возникновения разрушения большое влияние оказывает схема напряженного состояния: при объемной схеме напряженного состояния, когда все напряжения растягивающие, опасность возникновения разрушения значительно возрастает.

Кроме того, возникновение трещин, а затем разрушения зависят от остаточной пластичности или резерва пластичности. При возможности дополнительной пластической деформации существующие остаточные напряжения снимаются. Если же остаточная пластичность невелика или исчерпана не полностью, то возникновение и развитие трещин может происходить при достаточно высоких остаточных напряжениях, которые будут способствовать интенсивному развитию разрушения [22].

Большинство экспериментальных исследований показало, что сжимающие остаточные напряжения повышают, а растягивающие снижают усталостную прочность. Однако, как в случае вязкого разрушения, если значения суммы напряжений от нагрузки и остаточных напряжений близки к пределу текучести, то возникшее пластическое течение устранил влияние остаточных напряжений. Если же сумма напряжений от нагрузки и остаточных напряжений много меньше предела текучести, то остаточные напряжения будут влиять на усталостную прочность.

При циклических нагружениях сталей и сплавов, нагретых до высоких температур, влиянием остаточных напряжений из-за их релаксации можно пренебречь.

Влияние остаточных напряжений на усталостную прочность зависит от размеров детали. С увеличением размеров деталей характер разрушения при всех видах нагружения переходит от вязкого к хрупкому [23]. В связи с этим увеличивается и влияние остаточных напряжений.

Действие остаточных макронапряжений на прочность и долговечность изделий во многом осложняется наличием микронапряжений второго и третьего рода, которые могут достигать в локальных микрообъемах значительной величины и вызывать зарождение микротрещин [5].

Совокупность действия остаточных макро- и микронапряжений и вызывает, очевидно, совершенно неожиданные, самопроизвольные разрушения деталей и конструкций.

Исследованиями влияния остаточных напряжений на вибрационную стойкость и долговечность изделий занимались Кудрявцев И. В. [28, 29], Кобрин М. М. [30], Дятлов А. В. [31], Зигварт Г., Маэтсон Р. А. [32] и др. В результате однозначно установлено, что благоприятное распределение остаточных напряжений в изделиях во всех случаях может повысить вибрационную и усталостную прочность и долговечность. Наиболее обстоятельные исследования в этом направлении выполнены авторами [33], которые показали, что рост в наружных слоях изделия сжимающих остаточных напряжений повышает предел усталости, причем повышение может достигать 20 %. На основании результатов исследований можно заключить, что поверхность любых изделий является более «слабой» зоной, чем внутренние области, а поэтому любой процесс, который ведет к возникновению и росту поверхностных сжимающих напряжений, будет благоприятным для работы материала [34, 35].

Наиболее обстоятельно в литературе рассмотрено влияние остаточных напряжений на эксплуатационные свойства стальной, в частности канатной, проволоки.

Поскольку конечной целью канатного производства является получение качественных канатов, необходимо четко установить, каким образом изменение отдельных показателей качества проволоки, а следовательно, и параметров технологического процесса сказывается на усталостной прочности или, иначе говоря, на работоспособности готовых канатов.

Наиболее интересным представляется влияние величины остаточных напряжений на усталостную прочность проволоки и канатов. Рядом авторов рассмотрено влияние остаточных напряжений на работоспособность канатов. В работе НИИМетиза по этому вопросу указывается, что при больших остаточных напряжениях или изгибающих нагрузках работоспособность проволоки может понизиться на 20...25 % [36]. По данным работ [37–39] это влияние еще более существенно. Так, в них от-

мечено, что снижение величины остаточных напряжений в проволоке путем рихтовки на промежуточных размерах при волочении приводит к повышению работоспособности проволоки и каната на 35...40 %. Авторы [37] экспериментально обнаружили, что при снижении максимальных остаточных напряжений с 340 до 110 МПа работоспособность проволоки увеличилась на 38...65 %, а каната — на 72 %.

Авторы работы [40] для проверки влияния остаточных напряжений в проволоке на ее работоспособность испытали две партии образцов диаметром 2 мм на кручение вокруг оси с различными изгибами по дуге. В образцах первой партии максимальные остаточные напряжения составляли 500 МПа, во второй партии — не превышали 180 МПа. По результатам испытаний образцов на работоспособность авторы сделали вывод, что работоспособность проволоки в интервале вероятных нагрузок может быть выражена уравнением:

$$\ln n = a - (b \cdot k),$$

где  $n$  — число циклов до разрушения,  $k = \sigma_n / \sigma_{\sigma}$  — степень нагрузки проволоки,  $\sigma_n$  — осевое напряжение,  $\sigma_{\sigma}$  — временное сопротивление разрыву;  $a$  и  $b$  — коэффициенты, значения которых при  $\sigma_a = 180$  МПа —  $a = 4,0$ ,  $b = 1,82$ ; при  $\sigma_a = 500$  МПа —  $a = 4,47$ ,  $b = 2,98$ ;  $\sigma_a$  — величина максимального остаточного напряжения в проволоке.

В работе [40] указывается также на то, что деформирование каната при пропуске его в момент свивки через роликовые рихтующие аппараты снижает остаточные напряжения в проволоке (и исходные и возникающие при свивке), значительно увеличивая работоспособность каната (в среднем на 33 %). Однако режим деформации должен быть установлен правильно, иначе эффект может быть отрицательным [41].

Анализ микронапряжений в проволоке рентгеновскими методами показал, что максимальная работоспособность проволоки достигается при некотором оптимальном распределении остаточных напряжений по ее сечению [42, 43].

Вывод аналитической зависимости между величиной остаточных напряжений и пределом усталости стальной проволоки дан в диссертации В. И. Гайдученко. Формула для расчета количества циклов, которое выдерживает материал до разрушения, базируется на следующих трех допущениях.

Опытами установлено, что количество циклов, которое выдерживает материал до разрушения при данном характере действия периодически повторяющейся нагрузки, практически не зависит от скорости протекания процесса для довольно широкого диапазона скоростей. Этот опытный факт принят в качестве первого допущения.

Вторым допущением принято допущение о том, что энергия, поглощаемая материалом за один цикл испытания, остается неизменной почти до разрушения материала. Если не учитывать несколько первых и несколько последних циклов, то энергия, поглощаемая за промежуточные циклы, будет одна и та же.

В качестве третьего допущения принято:

$$\frac{\sigma_i^2}{\sigma_{-i}^2} + \frac{\tau_i^2}{\tau_{-i}^2} = 1,$$

где  $\sigma_i$  и  $\tau_i$  — соответственно максимальные напряжения при растяжении и кручении на пределе усталости;  $\sigma_{-i}$  и  $\tau_{-i}$  — соответственно предел усталости при знакопеременном изгибе и кручении.

Учитывая принятые допущения, была выведена формула для расчета количества циклов нагружения, выдерживаемых материалом до разрушения при знакопеременном кручении:

$$N = \frac{a}{\sigma^2 + m^2 \tau^2 - \sigma_{-i}^2 + c},$$

где  $a$  — количество работы, затрачиваемой на образование повреждений,  $m$  — произвольная константа,  $c$  — некоторый параметр.

Рядом проведенных экспериментов было показано, что величина параметра  $c$  на пределе усталости равна нулю.

Результирующее напряжение в поверхностных слоях материала при вращении образца будет меняться по закону:

$$\sigma_{\text{рез}} = \sigma \sin \frac{2\pi}{T} t + \sigma_0,$$

где  $\sigma_0$  — созданные в материале остаточные напряжения;  $\sigma$  — максимальное напряжение, которое возникает в поверхностном слое проволочки при ее вращении;  $T$  — период вращения образца.

$$N = \frac{a}{\sigma^2 + \sigma_0^2 - (\sigma_{-i}^*)^2},$$

где  $\sigma_{-i}^*$  — предел усталости материала при отсутствии в нем остаточных напряжений.

На пределе усталости  $N = \infty$ , тогда  $\sigma_{-i} = \sqrt{(\sigma_{-i}^*)^2 - (\sigma_0)^2}$ .

Отсюда автор делает вывод, что остаточные напряжения уменьшают величину фактического предела усталости  $\sigma_{-i}$  по сравнению с теоретически определенным значением  $\sigma_{-i}^*$ .



### 3. Экспериментальные методы определения наличия и уровня остаточных напряжений в металлоизделиях

---

За исключением рентгеновских все экспериментальные методы обнаружения и измерения остаточных напряжений в изделиях касаются напряжений первого рода, которые в основном и определяют эксплуатационные свойства продукции.

Все экспериментальные методы можно разделить (в некоторой степени условно) на:

- химические;
- рентгенографические;
- твердости;
- магнитные;
- поляризационно-оптические;
- термические и металлохимические.

*Химические методы*, чаще всего направленные на обнаружение и определение знака поверхностных напряжений, основаны на явлении влияния остаточных (и не только) напряжений на коррозионную стойкость металла. Не следует относить к химическим методам те, где используется химическая обработка для удаления поверхностных слоев металлоизделий, которые по своей сущности являются механическими.

Все *механические методы* являются разрушающими и заключаются в замере деформаций (чаще всего упругих) после удаления части металла изделия, за счет которого происходит перераспределение в объеме внутренних напряжений.

Механические методы находят ограниченное применение, так как изделие подвергается частичному или полному разрушению и, кроме того, он не всегда пригоден для исследования объектов простейшей

формы, например сферической, или тел вращения с осевой симметрией. Этот метод основан на том, что остаточные напряжения взаимно уравновешены внутри самого тела. Поэтому при разрезании тела в исследуемой части возникают упругие деформации, которые должны обратить в ноль равнодействующую и момент остаточных напряжений, создавая тем самым новое равновесие напряжений в теле. Измеряя возникшие деформации, можно в каждом конкретном случае определить величину остаточных напряжений, действующих в удаленной части тела.

Методы химического или электролитического травливания, несмотря на разнообразие аппаратуры, базируются на тех же основных принципах, что и механические методы: на основании замеров изменяющихся размеров тела при травливании с его поверхности слоев металла вычисляют деформации, а затем и величину остаточных напряжений.

*Рентгенографические методы* имеют следующие преимущества перед механическими и химическими: во-первых, сохраняется объект исследования, если ограничиваться измерением напряжений в поверхностных слоях; во-вторых, появляется возможность измерять напряжения в каждой точке поверхности при любом, даже несимметричном, распределении напряжений.

*Метод твердости* заключается в использовании влияния внутренних напряжений на величину твердости напряженных тел.

*Магнитный метод* основан на зависимости между магнитными свойствами металла и упругими напряжениями.

*Поляризационно-оптический метод* базируется на исследовании деформаций на поверхности металла с использованием оптически активных пленок.

*Термический метод* заключается в определении остаточных напряжений, используя способность металлических изделий изменять размеры при отжиге.

Таким образом, все перечисленные методы определения остаточных напряжений в металлических изделиях можно разделить на две большие группы: разрушающие изделие и неразрушающие. Применение того или иного метода обуславливается конкретными условиями исследования. Однако наиболее распространены первые шесть методов. Для определения остаточных напряжений в трубах и проволоке получили распространение следующие методы: одностороннее

спиливание или сошлифовывание образца на определенной длине; снятие концентрических слоев сечения; термический и рентгенографический.

### 3.1. Химические методы анализа остаточных напряжений

Химические методы нашли наиболее широкое применение для оценки склонности латуней к коррозионному растрескиванию, во многом связанному с наличием и неблагоприятным распределением остаточных напряжений. Коррозионное растрескивание особо опасно для латунных труб и подобных тонкостенных изделий.

Химическим методом определяют склонность к растрескиванию с помощью воздействия на изделия определенных химических реагентов: растворов ртутных солей; аммиачной среды; сернистого газа [19].

#### **Ртутная проба**

Способность растворов ртутных солей вызывать трещины в напряженной латуни известна давно: на этом свойстве основано применение метода испытания латунных изделий на растрескивание погружением их в раствор ртутной соли определенной концентрации.

В качестве реактивов применялись хлорная ртуть (сулема) и азотно-кислая закись ртути.

Растворы хлорной ртути в настоящее время почти не применяются для испытаний, испытания предпочитают производить в растворах  $\text{HgNO}_3$ .

Основанием для такого предпочтения послужило следующее.

1. Растрескивание латунных образцов в растворах сулемы происходит медленнее, чем в азотно-кислой ртути.

2. Образцы в растворах сулемы покрываются темно-серым налетом, затрудняющим обнаружение трещин, тогда как в растворе азотно-кислой ртути образуется блестящее покрытие металлической ртутью.

3. Сулема более ядовита, чем азотно-кислая закись ртути.

При испытаниях применяется следующая методика. Латунные образцы, предварительно протравленные в 33 %-ной азотной кислоте (уд. вес 1,2) в течение 30 с, погружают в раствор 1 %-ной азотно-кислой закиси ртути и 1 %-ной азотной кислоты. Количество раствора устанавли-

ливается из расчета  $10 \text{ см}^3$  раствора на  $6...7 \text{ см}^2$  поверхности латуни; испытание проводится при комнатной температуре.

На продолжительность испытания до появления трещин весьма значительное влияние оказывает величина растягивающих напряжений в поверхностных слоях латунных образцов. При больших напряжениях образцы растрескиваются спустя несколько секунд после погружения в раствор. С уменьшением напряжений продолжительность выдержки до растрескивания возрастает. Испытание латуни погружением в раствор ртутных солей характеризуется наличием определенного порога чувствительности к величине растягивающих напряжений в металле: образцы, имеющие напряжения ниже  $100 \text{ МПа}$ , не растрескиваются совсем.

В последнее время и в иностранной литературе появились указания о недостатках такого испытания с теоретической и практической точек зрения. Отмечалось, что оно не привело к лучшему пониманию коррозионного растрескивания, а применение его, возможно, затормозило теоретическое исследование этого явления.

Ртутную пробу можно применять для оценки величины растягивающих напряжений в латунных изделиях или полуфабрикатах и склонности их к растрескиванию, если химический состав, механические свойства и микроструктура сопоставляемых образцов существенно не отличаются друг от друга.

Испытание изделий из медных сплавов погружением в 10 %-ный водный раствор азотно-кислой закиси ртути включено в ГОСТ 2203 на морские трубы из медно-алюминиевого сплава. Применение такого испытания в данном случае не вполне обосновано, так как воздействие ртути или ее солей на морские трубы при хранении или эксплуатации вряд ли может иметь место.

Образцы после испытания в растворе ртутной соли покрываются слоем контактно осажденной металлической ртути. Поэтому переплавлять эти образцы можно только после предварительной отгонки ртути. Вследствие большой вредности ртутных паров эту отгонку нужно осуществлять только в специальной печи с холодильником для сбора ртути.

### **Аммиачная проба**

При этом испытании образцы помещают в эксикатор или бачок с крышкой, на дно которых наливают водный раствор аммиака определенной концентрации.

Предложенная авторами [19] методика заключается в следующих последовательных операциях:

- 1) обезжиривание образцов протиранием ватой, смоченной органическим растворителем;
- 2) травление образцов (30 с) в растворе азотной кислоты, приготовляемом смешением азотной кислоты уд. веса 1,4 и воды в соотношении 1:1;
- 3) промывка в проточной воде;
- 4) испытание влажных образцов в закрытой камере (эксикаторе) над концентрированным водным раствором аммиака в течение нескольких часов или даже суток;
- 5) травление в растворе азотной кислоты (1:1) для удаления продуктов коррозии, образовавшихся при испытаниях в аммиачной атмосфере;
- 6) осмотр образцов через лупу при увеличении  $\times 15$ .

Растрескивание латуни в атмосфере над водным раствором аммиака может произойти при наличии в ней весьма небольших растягивающих напряжений, равных всего лишь 10...20 МПа.

Существенным недостатком испытаний в аммиачной атмосфере над водными растворами аммиака различной концентрации является необходимость строгого контроля постоянства температуры испытания; обычно рекомендуется поддерживать температуру эксикатора или бачка, в котором проводятся испытания, равной  $20 \pm 2$  °С. Колебания температуры приводят к значительным изменениям в содержании аммиачных водяных паров в атмосфере над водным раствором аммиака. Так, например, при понижении температуры на 10 °С концентрация аммиака в атмосфере над 25 %-ным раствором  $\text{NH}_3$  уменьшается в полтора раза, а влаги — в два раза по сравнению с концентрацией этих веществ в аммиачной атмосфере при 20 °С, что весьма существенно замедляет процесс растрескивания испытываемых образцов. Повышение температуры на 10 °С приводит к увеличению концентрации  $\text{NH}_3$  и  $\text{H}_2\text{O}$  в атмосфере над аммиачным раствором примерно в тех же соотношениях, вызывая значительное сокращение времени выдержки до появления трещин.

Процесс испытания влажной латуни в эксикаторах над водным раствором аммиака можно условно разделить на четыре стадии.

1. Образование влажной аммиачной атмосферы внутри испытательной камеры. Эта стадия начинается с момента введения в камеру

водного раствора аммиака и заканчивается после ее насыщения парами аммиака.

Парциальное давление аммиака над его крепкими водными растворами достигает значительной величины. После того как на дно эксикатора наливают концентрированный раствор аммиака, возникает столь большое избыточное давление, которое может приподнять крышку эксикатора.

2. При внесении влажной латуни в аммиачную атмосферу внутри эксикатора происходит некоторое уменьшение парциального давления аммиака вследствие растворения его в воде, находящейся на поверхности латуни. Затем давление аммиака снова повышается вследствие дальнейшего испарения его из раствора. По окончании этой стадии латунь оказывается смоченной раствором аммиака, концентрация которого равняется концентрации раствора, над которым проводится испытание.

3. Аммиачный раствор, покрывающий поверхность латуни, в присутствии кислорода воздуха, который также находится внутри испытательной камеры (эксикатора), вызывает окисление латуни и образование аммиакатов меди и цинка. Общая поверхностная коррозия латуни (окисление ее) сопровождается уменьшением содержания кислорода в атмосфере камеры.

4. Образовавшийся на поверхности металла медно-аммиачный раствор вызывает растрескивание, если в латуни имеются растягивающие напряжения.

В соответствии с утвержденной методикой аммиачную пробку делают на образцах длиной 100 мм, отрезанных от заготовок, как правило, на токарном станке с применением (для закрепления) бронзовых или алюминиевых оправок. В отдельных случаях допускается отрезка образцов ножовкой с применением тех же оправок или легкого зажима в тисках с алюминиевыми губками.

Один из торцов должен быть строго перпендикулярен оси трубы. Одновременно с образцами, которые будут подвергнуты аммиачной пробке, отрезаются образцы для испытания методом разрезания колец.

Не требуется набивка клеем на образцах. Номера следует надписывать электрографом. Перед испытанием образцы обезжириваются промывкой бензином или содовым раствором. Затем поверхность образцов для удаления окислов травится водным раствором азотной кислоты (1:1) в течение 30 с при температуре 30 °С. Влажные образцы

устанавливаются на подставке в герметически закрытом эксикаторе, на дно которого налит аммиак (плотность 0,95). Количество аммиака должно быть таким, чтобы на 1 л атмосферы приходилось 15 см<sup>3</sup> аммиачного раствора. Не допускать попадания брызг аммиака на образцы трубок. Образцы должны находиться в аммиачной атмосфере не менее 24 ч. По истечении указанного срока образцы вынимаются из эксикатора, промываются водой, протравливаются для удаления продуктов коррозии водным раствором азотной кислоты (1:1), вновь промываются водой и быстро просушиваются. Производится внешний осмотр образцов.

В латунных трубках, имеющих значительные остаточные напряжения, во время пребывания в атмосфере аммиака появляются трещины. Отсутствие трещин после испытаний в атмосфере аммиака является гарантией надежного поведения латунных трубок в условиях эксплуатации.

Иногда при испытаниях обнаруживаются паучкообразные трещины возле вмятин, а также трещины, отходящие от места реза образца и имеющие протяженность не более 20 мм. Такие трещины во внимание не принимаются.

Характер растрескивания латунных изделий и полуфабрикатов при испытании в атмосфере, содержащей сернистый газ, лучше соответствует испытаниям в естественных условиях, чем в аммиачной атмосфере [20].

При аммиачном испытании трещины в латуни развивались по различным направлениям, тогда как при воздействии сернистого газа трещины возникали вдоль трубы, что соответствовало направлению трещин, возникших в этих трубах при их хранении в естественных условиях.

Такой характер распространения трещин при испытании в атмосфере, содержащей сернистый газ, вызван тем, что эта атмосфера может привести к растрескиванию латуни только при наличии значительных растягивающих напряжений в металле. В исследовавшейся трубе такие напряжения имелись в тангенциальном направлении, поэтому трещины развивались перпендикулярно этому направлению, т. е. вдоль трубы.

Учитывая изложенное, вполне обоснованно применять контрольное испытание латунных изделий и полуфабрикатов в атмосфере, содержащей примесь сернистого газа.



Для таких испытаний применять водный раствор сернистой кислоты не рекомендуется из-за его высокой активности; лучше проводить испытания в водном растворе сульфита и серной кислоты, смешиваемых непосредственно перед вливанием на дно эксикатора. Рекомендуется применять безводный сульфит, так как он более устойчив против окисления при хранении, чем кристаллический.

Впредь до уточнения методики можно проводить испытания в 8...10 эксикаторах, на дно которых налит 1 л водного раствора, содержащего 1 г  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  и 5 мл  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (уд. вес 1,84).

Предложенная методика испытаний не лишена недостатков и поэтому не может еще считаться полностью отработанной. К недостаткам данной методики следует отнести следующие.

1. Длительность испытания. Даже при наличии весьма значительных растягивающих напряжений латунные образцы в виде колец растрескиваются только через несколько часов.

2. Процессы общей коррозии и обесцинкования, проходящие одновременно с растрескиванием.

Рентгенографический метод оценки склонности латунных образцов к растрескиванию по размытию линий рентгенограмм является неподходящим, так как прямой связи между размытием линий и склонностью образцов к растрескиванию не имеется. Оценка по смещению линий затруднена тем, что линии рентгенограмм холоднодеформированной латуни не являются резко очерченными.

Наиболее правильным методом оценки подверженности к растрескиванию латуни является испытание с помощью специальных химических реагентов. Выбор химического реагента для испытания должен быть сделан в соответствии с условиями, в которых будет находиться продукция из латуни.

Коррозионному растрескиванию подвержены также коррозионно-стойкие, в частности, аустенитные стали. Склонность к межкристаллитной коррозии этих сталей, так же как и латуней, выявляется химическими методами анализа. В работе [44] отмечается, что коррозионное растрескивание — разрушение под действием растягивающих напряжений и коррозионно-активной среды — распространенный в практике вид разрушения коррозионно-стойких сталей. Такому разрушению подвержены трубопроводы, выпарные аппараты, автоклавы и другие детали химического и энергетического оборудования. Наличие растягивающих напряжений является необходимым услови-

ем коррозионного растрескивания. Эти напряжения могут возникать как вследствие эксплуатационных нагрузок, так и в процессе изготовления конструкции (при гибке, сварке, термической или механической обработке). Коррозионная среда может способствовать образованию и развитию трещины в результате анодного растворения стали в устье трещины или в результате адсорбции водорода и его диффузии в сталь. В последнем случае коррозионное растрескивание связывают с явлением водородной хрупкости.

Средами, вызывающими коррозионное растрескивание, являются водные растворы хлористых солей, щелочей, растворы некоторых азотно-кислых солей и органических соединений, а также паровая среда энергетических установок. Существует напряжение  $\sigma_{кр}$  — предел длительной коррозионной стойкости, ниже которого коррозионного растрескивания не наблюдается. Соотношение между прочностными характеристиками и  $\sigma_{кр}$  коррозионно-стойких сталей различных классов приведено в табл. 1.

Аустенитные стали плохо сопротивляются коррозионному растрескиванию. В случае необходимости применения аустенитных сталей положительное влияние на стойкость оказывает никель: чем больше его содержание (в диапазоне 10...40 % Ni), тем выше  $\sigma_{кр}$ . При 40 % Ni сталь невосприимчива к коррозионному растрескиванию.

Таблица 1

$\sigma_b$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_{кр}$  при 150 °С некоторых коррозионно-стойких сталей

Марка стали	Структурный класс	$\sigma_b$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{кр}$
		МПа		
08X17 Т	Ферритный	400	280	350
15X25 Т	«	470	320	450
08X18 Н10 Т	Аустенитный	450	220	150
10X14 Г14 Н4 Т	«	430	180	100
10X17 Н13 М2 Т	«	500	240	170
08X11 Н5 Т	Аустенитно-ферритный	520	350	350
08X21 Н6 М2 Т	«	550	360	210
08X18 Г8 Н2 Т	«	540	350	450

### 3.2. Механические методы анализа остаточных напряжений

Впервые понятие об остаточных напряжениях и методе их определения дал в 1887 г. Н. В. Калакуцкий, который провел серию опытов по определению остаточных напряжений в оружейных стволах. Им же был разработан способ определения остаточных напряжений в листовом металле. По изменению диаметра вырезанного кольца Н. В. Калакуцкий судил о «давлении» (т. е. напряжении), действовавшем в металле.

Работы Н. В. Калакуцкого стали основой многих методов исследования остаточных напряжений, заключающихся в замере деформаций образцов, происходящих при их разрушении. Переход от измеренных деформаций к напряжениям осуществляется на основе законов теории упругости.

Механические методы получили широкое применение при определении напряжений в прутках, проволоке, трубах после холодной деформации. И. А. Биргер систематизировал и математически обосновал механические методы определения остаточных напряжений в деталях наиболее распространенных форм [7].

#### Метод Закса

Используется преимущественно для экспериментального определения остаточных напряжений в прутках и толстостенных трубах.

Основное достоинство этого метода заключается в возможности определения объемной картины распределения остаточных продольных, тангенциальных и радиальных напряжений по телу образца. При послойной обточке трубы каждый раз замеряются длина и диаметр образца. На основании опытных данных строятся графики зависимости поперечных и продольных деформаций от величины площади сечения удаляемого слоя.

При удалении слоев металла изнутри трубы напряжения будут равны:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= \left[ E / (1 - \nu^2) \right] \left[ (F_D - F) d\Lambda / dF - \Lambda \right], \\ \sigma_r &= \left[ E / (1 - \nu^2) \right] \left[ (F_D - F) d\theta / dF - 0,5 (F_D / F + 1) \theta \right], \\ \sigma_\varphi &= 0,5 \left[ E / (1 - \nu^2) \right] (F_D / F - 1) \theta ; \end{aligned} \right\}$$

при удалении наружных слоев металла:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= \left[ E/(1-\nu^2) \right] \left[ (F - F_d) d\Lambda/dF - \Lambda \right], \\ \sigma_r &= \left[ E/(1-\nu^2) \right] \left[ (F - F_d) d\theta/dF - 0,5(F_d/F + 1)\theta \right], \\ \sigma_\varphi &= 0,5 \left[ E/(1-\nu^2) \right] (F_d/F - 1)\theta, \end{aligned} \right\}$$

где  $E$  — модуль упругости;  $F_D = \pi D^2/4$  — площадь круга, ограниченного наружным диаметром;  $F_d = \pi d^2/4$  — площадь круга, ограниченного внутренним диаметром;  $F$  — переменная площадь, соответствующая каждому этапу расточки;  $\Lambda = \lambda + \nu\theta$  — функция изменения длины;  $\theta = \nu + \nu\lambda$  — функция изменения диаметра;  $\lambda, \nu$  — относительное изменение длины и диаметра.

Производные  $d\Lambda/dF$  и  $d\theta/dF$  определяются графически по кривым  $\Lambda = \varphi(F)$  и  $\theta = \psi(F)$ , построенным на основании экспериментальных данных. Однако у предложенного Заксом метода есть существенные недостатки [5]:

- невозможно определить напряжения по всей толщине сечения, так как, начиная с некоторого момента, стенка становится слишком тонкой, в связи с этим деформации в этой области определяют экстраполяцией, что вносит известные погрешности;
- необходима корректировка деформационной кривой, построенной по экспериментальным данным;
- необходимы высокоточные средства измерения весьма малых деформаций изделия при последовательных удалениях слоев металла;
- возможны значительные погрешности при замерах на начальной стадии расточки, когда абсолютные значения измеряемых величин соизмеримы с точностью применяемых инструментов;
- необходимо применение длинных образцов для исключения влияния концов ( $l_{\text{обр}} \geq 2D_{\text{нар}}$ ), что в свою очередь требует специальных приспособлений для расточки и центровки изделия.

В дальнейшем метод Закса усовершенствовался различными исследователями.

Сущность метода, предложенного Бюлером, заключается в том, что напряжения в сечении цилиндра определяют по единой дефор-

мационной кривой, построенной с учетом кривых для  $\Lambda$  и  $\theta$ , рассчитанных при обточке цилиндра [35]. Однако единая деформационная кривая является приближенной в связи с неточностью учета деформаций остающейся необточенной части цилиндра.

Бюлер также показал, что при сквозном определении остаточных напряжений по методу Закса можно избежать графического дифференцирования, определив  $d\Lambda/dF$  и  $d\theta/dF$  из уравнения Закса методом конечных разностей.

Другой способ замены экстраполяции интерполяцией при совмещении операций расточки и обточки на одном образце предложен Л. А. Гликманом и А. Н. Бабаевым [46]. Напряжения в средней части образца определяются в результате интерполяции. Однако, в отличие от поправки Бюлера, напряжения приходится рассчитывать по различным формулам для каждой части. В эпюру напряжений вводится поправка на снятие напряжений при предварительной обточке (расточке) той части образца, которая подвергается заключительной резцовой обработке.

Преимущества обоих вышеуказанных способов сочетаются в методе уточненного расчета, предложенном М. М. Кобриным и Л. И. Дехтярем [45].

В этом методе поправка при расчете деформации последней части образца в процессе предварительной обточки или расточки учитывается не в эпюре напряжений, как предложено в работе [46], а по единой деформационной кривой, которую строят аналитически, а не с помощью графического метода Бюлера.

Введение поправки при расчете деформации, а не напряжения позволяет рассчитывать остаточные напряжения по отдельным формулам для участков обточки и расточки с последующей интерполяцией либо по единым формулам, как для участков расточки, так и для участков обточки по всей длине радиуса.

Данная методика позволила применить ЭВМ для расчета остаточных напряжений по методу Закса [46, 47].

В общем случае для определения остаточных напряжений по методу Закса из детали вырезается цилиндрический образец и производится его коаксиальное сверление.

В результате вырезки образца конечной длины  $l$  осевые напряжения  $\sigma_z$  на торцах обнуляются, но на некотором расстоянии от торца  $l_k$ , согласно известному принципу Сен-Венана, они сохраняют преж-

ние технологические значения. Обычно принимают  $l_k = R_2$ , где  $R_2$  — наружный радиус образца.

После сверления производится последовательная расточка цилиндра с изменением окружной и осевой деформаций на внешнем радиусе. Далее производятся замеры изменения наружного диаметра и базовой длины. Обычно с целью повышения точности и надежности деформации измеряют тензометрами. При очередной расточке цилиндра в его объеме неминуемо возникают дополнительные напряжения  $\sigma_{iD}$ . Если цилиндр с начальным радиусом внутренней поверхности  $R_1$  расточен до радиуса  $r_1$ , то дополнительное тангенциальное напряжение  $\sigma_{\varphi D}$  может быть найдено на поверхности радиуса  $r$  в соответствии с теорией тонкостенных цилиндров по формуле

$$\sigma_{\varphi D} = \sigma_r(r) \frac{2r^2}{R_2^2 - r_1^2}.$$

Дополнительное радиальное напряжение равно нулю:  $\sigma_{rD}(R_2) = 0$ . Величину дополнительного осевого напряжения можно найти на наружной поверхности по формуле  $\sigma_{zD}(R_2) = \frac{2}{R_2^2 - r_1^2} \int_{R_1}^{R_2} \sigma_z(r) r dr$ , где  $r$  — текущий радиус.

В соответствии с законом Гука

$$\varepsilon_{\varphi 2}(r_1) = \frac{1}{E} \left\{ \sigma_{\varphi D}(R_2) - \mu [\sigma_{zD}(R_2) + \sigma_{rD}(R_2)] \right\};$$

$$\varepsilon_{z2}(r_1) = \frac{1}{E} \left\{ \sigma_{zD}(R_2) - \mu [\sigma_{\varphi D}(R_2) + \sigma_{rD}(R_2)] \right\}.$$

Переходя от деформации к напряжениям, по методу Закса получаем выражение:

$$\sigma_r(r_1) = \frac{E}{1 - \mu^2} \frac{R_2^2 - r_1^2}{2r_1^2} [\varepsilon_{\varphi 2}(r_1) + \mu \varepsilon_{z2}(r_1)];$$

$$\sigma_z(r_1) = \frac{E}{1 - \mu^2} \left[ \frac{R_2^2 - r_1^2}{2r_1} \left( \frac{d\varepsilon_{z2}(r_1)}{dr_1} + \mu \frac{d\varepsilon_{\varphi 2}(r_1)}{dr_1} \right) - \varepsilon_{z2}(r) - \mu \varepsilon_{\varphi 2}(r) \right],$$

где  $\varepsilon_{\varphi 2}(r_1)$  и  $\varepsilon_{z2}(r_1)$  — деформации в тангенциальном и осевом направлениях на внешнем радиусе, возникшие в результате расточки отверстия до радиуса  $r_1$ .

Окружное остаточное напряжение может быть определено из условия равновесия цилиндрического образца

$$\sigma_{\varphi}(r_1) = \frac{E}{1-\mu^2} \left[ \frac{R_2^2 - r_1^2}{2r_1} \left( \frac{d\varepsilon_{\varphi 2}(r_1)}{dr_1} + \mu \frac{d\varepsilon_{z2}(r_1)}{dr_1} \right) - \frac{R_2^2 - r_1^2}{2r_1^2} (\varepsilon_{\varphi 2}(r_1) + \mu \varepsilon_{z2}(r_1)) \right].$$

Эти формулы справедливы как для полых, так и сплошных цилиндров.

### Метод Н. Н. Давиденкова

Метод, пригодный для определения остаточных напряжений в полых цилиндрах и трубах, предложен Н. Н. Давиденковым еще в 1931 году и до настоящего времени считается классическим.

Для определения тангенциальных нормальных напряжений образец трубы сначала разрезается по образующей с замером изменения диаметра, затем подвергается растворению в кислоте последовательными слоями небольшой толщины, при этом также каждый раз замеряется изменение диаметра.

Остаточное тангенциальное напряжение в каждом слое представляется в виде суммы трех составляющих:

$$\sigma_{\varphi} = \sigma_{\varphi 1} + \sigma_{\varphi 2} + \sigma_{\varphi 3},$$

где  $\sigma_{\varphi 1}$  — напряжение, снимающееся при разрезке кольца по образующей;  $\sigma_{\varphi 2}$  — напряжение, снимающееся при удалении слоя;  $\sigma_{\varphi 3}$  — напряжение, снимающееся в слое при последовательном удалении предыдущих слоев.

При удалении слоев металла с внутренней поверхности труб выражения для составляющих остаточного тангенциального напряжения будут иметь вид:



$$\sigma_{\varphi 1} = \left[ E / (1 - \nu^2) \right] (\Delta D / D_{\text{ср}}) \left[ z + s^2 / (6 D_{\text{ср}}) \right] / (z + 0,5 D_{\text{ср}}),$$

$$\sigma_{\varphi 2} = (dD/da) E a^2 / 3 (1 - \nu^2) (D_0 - a),$$

$$\sigma_{\varphi 3} = 2E \left[ \frac{-3a(D_a - D_s) + (1 - z a / D_0) \times}{\times \int_{D_s}^{D_a} x dD + (1/D_0 - a/D_0^2) \int_{D_s}^{D_a} x^2 dD} \right] / \left[ 3(1 - \nu^2) (D_0 - 2a) D_0 \right],$$

где  $z$  — расстояние от слоя до средней линии образца;  $D_{\text{ср}}$  — диаметр средней окружности кольца;  $a$  — расстояние от наружной поверхности до середины удаляемого слоя;  $D_0$  — наружный диаметр образца;  $D_a$  и  $D_s$  — наружные диаметры при толщинах стенки  $a$  и  $s$  соответственно.

Для определения продольных остаточных напряжений из трубы вырезается узкая полоска, параллельная оси трубы, и замеряется возникший при этом ее прогиб. Затем удаляют слои с замером происходящих при этом деформаций (изменений прогиба).

Остаточное продольное напряжение  $\sigma_z = \sigma_{z1} + \sigma_{z2} + \sigma_{z3}$ . Составляющие  $\sigma_{z1}$ ,  $\sigma_{z2}$ ,  $\sigma_{z3}$  определяются из выражений:

$$\sigma_{z1} = 2E(0,5s - a)f/b^2,$$

$$\sigma_{z2} = - \left[ (Ea^2/3b^2) \right] df/da,$$

$$\sigma_{z3} = \left[ 2E/(3b^2) \right] \int_{f_s}^{f_a} x df - (2Ea/b^2)(f_a - f_s),$$

где  $b$  — полухорда;  $f$  — прогиб полоски;  $f_a, f_s$  — прогиб полоски при ее толщине  $a$  и  $s$  соответственно.

Если достаточно знать напряжения только в поверхностных слоях, необходимо снять по тонкому слою металла снаружи и изнутри трубы на разных участках и вычислить составляющую,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  в этом случае рассчитывать необязательно. Если металл образца плохо растворяется, то слои можно удалять растачиванием, причем необходимо сначала расточить образец до необходимой толщины, а потом разрезать.

Количество образцов при этом соответствует числу удаляемых слоев, аналогично методу Фокса. Здесь возникают те же требования к идентичности напряженного состояния во всех используемых образцах. Вообще говоря, применение травления для снятия слоев более предпочтительно, чем механическое удаление расточкой, ибо, как следует из работы [7], при определенных условиях резания в поверхностных слоях образца могут возникнуть высокие напряжения сжатия. Эти напряжения, накладываясь на основное поле остаточных напряжений, могут его значительно изменить. При механической расточке необходимо поддерживать определенную скорость резания и подачу охлаждающей эмульсии, чтобы исключить их влияние на величину напряжений в образце. Поэтому многие исследователи используют для снятия слоев химические методы — растворение в растворителе определенного состава или электрополирование.

Метод Н. Н. Давиденкова применим и для толстостенных труб. В работе [5] проведено сравнение методов Закса, Калакуцкого и Давиденкова при определении остаточных напряжений в трубах размерами  $19 \times 8$  и  $8,5 \times 2,75$  мм. Показано, что точность определения напряжений по методу Давиденкова наиболее высока, поскольку измеряемые деформации в этом случае значительно больше, чем при определении напряжений по методам Закса и Калакуцкого.

### **Метод разрезных колец**

Идея метода принадлежит одному из первых исследователей остаточных напряжений Н. В. Калакуцкому, который его применил для анализа напряженного состояния относительно тонких дисков.

Для определения остаточных напряжений из диска вырезаются кольца и измеряется изменение диаметра кольца в результате вырезки (см. рис. 9, а). Предварительно для удобства измерения торцы диска шлифуются, на середине толщины кольца наносится кольцевая риска. Далее по трем диаметрам, расположенным под углом  $120^\circ$  друг к другу, наносятся радиальные риски. Образовавшиеся перекрестия используются для измерений на оптических измерительных приборах. Более точные измерения могут быть осуществлены с помощью проволочных тензометров, которые наклеиваются до вырезки колец.

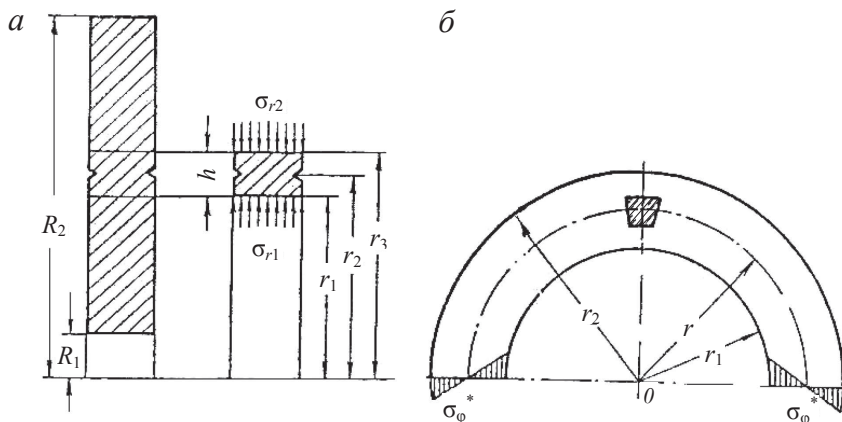


Рис. 9. К методу колец Н. В. Калакуцкого

Пусть средний радиус кольца равен  $r$  и радиальная толщина  $h$ . Напряжения в диске на радиусе  $r$  равны  $\sigma_r(r)$  и  $\sigma_\phi(r)$ . Вырезка кольца эквивалентна приложению обратных остаточных напряжений на радиусах  $R_1$  и  $R_2$ .

Если  $h$  мало (по сравнению с радиусом), то

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{r2} &= - \left[ \sigma_r(r) + \frac{1}{2} h \frac{d\sigma_r}{dr}(r) \right]; \\ \sigma_{r1} &= - \left[ \sigma_r(r) - \frac{1}{2} h \frac{d\sigma_r}{dr}(r) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Радиусы кольца

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= r - \frac{1}{2} h; \\ r_2 &= r + \frac{1}{2} h. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Внося равенства (6) и (7) в формулу момента инерции сечения кольца и пренебрегая членами, содержащими  $h^2/r^2$ , получают, учитывая условие равновесия,

$$\varepsilon_\phi(r) = \frac{u(r)}{r} = -\frac{1}{E} [\sigma_\phi(r) - \mu \sigma_r(r)]. \quad (8)$$

Это равенство вытекает из следующих простых соображений. Остаточные напряжения в кольце после вырезки показаны на рис. 9, б. Равнодействующая окружных остаточных напряжений на кольце в силу условий симметрии равна нулю.

Радиальные напряжения в кольце отсутствуют на радиусах  $R_1$  и  $R_2$  и ими можно пренебречь на всех других радиусах. Таким образом, приближенно можно считать, что вырезка кольца соответствует полному освобождению элемента, расположенному на оси кольца. Условие (8) выражает деформацию элемента (в окружном направлении) при полном его освобождении. Величина  $\varepsilon_\varphi(r)$  может быть измерена проволочными тензометрами или вычислена по замеренному значению радиального перемещения оси кольца  $u(r)$ . Так как возможные погрешности связаны с отношением  $h/r$ , то с уменьшением радиуса кольца следует уменьшать и его толщину.

Отметим, что если используются проволочные тензометры и высота кольца  $h$  достаточна для размещения их в радиальном направлении, то целесообразно измерить изменение радиальной деформации:

$$\varepsilon_r(r) = -\frac{1}{E} [\sigma_r(r) - \mu \sigma_\varphi(r)];$$

в этом случае метод колец превращается в метод полного освобождения.

Если же проводится измерение диаметров или кольца имеют небольшую высоту, то с помощью излагаемого ниже метода можно определить остаточные напряжения аналитическим путем, зная только величины  $\varepsilon_\varphi(r)$ .

Второе уравнение между неизвестными величинами остаточных напряжений в диске вытекает из условия равновесия

$$\frac{d\sigma_r(r)}{dr} = \frac{1}{r} [\sigma_\varphi(r) - \sigma_r(r)]. \quad (9)$$

На основании уравнений (8) и (9) можно определить остаточные напряжения в диске.

Обычно для этого проводят расчет по участкам, начиная с наружного или внутреннего кольца. С математической точки зрения этот метод представляет собой метод конечных разностей.

Метод колец Н. В. Калакуцкого в дальнейшем был усовершенствован Н. Н. Давиденковым и получил название метода разрезки колец.

Он заключается в вырезке кольца, разрезке вдоль образующей и в за-  
мере изменения диаметра в результате разрезки.

После вырезки кольца, как уже отмечалось, в нем исчезают сред-  
ние окружные напряжения  $\sigma_{\varphi д} = -\sigma_{\varphi ср}$  (рис. 10, а). Если  $\sigma_{\varphi}$  — истин-  
ные остаточные напряжения, то  $\sigma_{\varphi} = \sigma_{\varphi ср} + \dot{\sigma}_{\varphi}$ , где  $\dot{\sigma}_{\varphi}$  — остаточные  
напряжения в кольце после его вырезки.

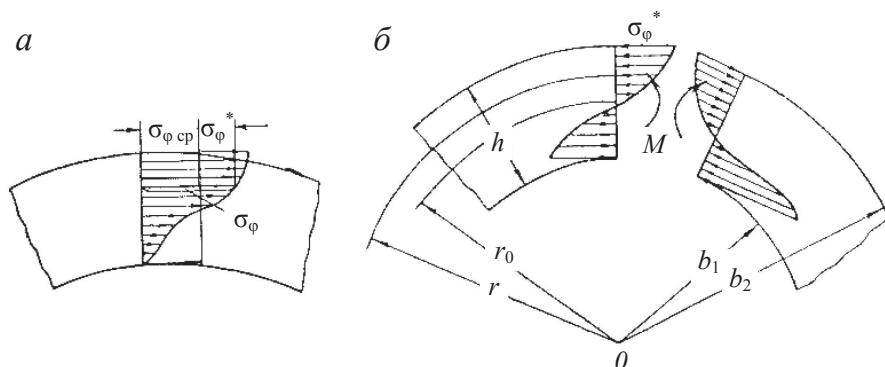


Рис. 10. Распределение окружных остаточных напряжений в кольце до — а  
и после разрезки — б

Последующая разрезка кольца по образующей (см. рис. 10, б) эк-  
вивалентна приложению к поверхности разреза обратных остаточных  
напряжений  $\dot{\sigma}_{\varphi}$ . Эти напряжения создают изгибающий момент

$$M = H \int_{b_1}^{b_2} \dot{\sigma}_{\varphi}(r)(r - r_0) dr_1, \quad (10)$$

причем направление момента показано на рис. 10, б. Здесь  $H$  — тол-  
щина диска;  $r_0$  — средний радиус кольца.

Увеличение диаметра кольца в результате действия момента

$$\delta = \frac{M d_0^2}{2 E J} = \frac{2 M r_0^2}{E J}, \quad (11)$$

где  $EJ$  — жесткость сечения кольца на изгиб;  $d_0 = 2r_0$  — диаметр осе-  
вой окружности кольца. Основное допущение в методе разрезки ко-  
лец заключается в том, что напряжения  $\dot{\sigma}_{\varphi}(r)$  заменяются линейно-  
распределенными по толщине кольца

$$\dot{\sigma}_{\varphi}(r) \approx k(r - r_0). \quad (12)$$

Коэффициент  $k$  выбирается таким образом, чтобы величина изгибающего момента осталась без изменения.

Внося значение  $\dot{\sigma}_{\varphi}(r)$  в равенство (10), получим

$$M = k H \int_{b_1}^{b_2} (r - r_0)^2 dr = k J ,$$

где  $J$  — момент инерции сечения кольца.

Теперь из соотношения (11) следует:

$$k = \frac{2E\delta}{d_0^2} . \quad (13)$$

Дифференцируя приближенное равенство (12), получим

$$\frac{d\dot{\sigma}_{\varphi}}{dr}(r) \approx k .$$

На основании зависимости (13)

$$\frac{d\dot{\sigma}_{\varphi}(r)}{dr} \approx \frac{2E\delta}{d_0^2} ; \quad (14)$$

это соотношение носит приближенный характер и определяет некоторое среднее значение производной.

Точность равенства (14) повышается, если действительное распределение напряжений мало отличается от линейного.

Метод разрезных колец был использован Андерсеном Р. и Фальманом Е. для определения остаточных напряжений в трубах [14].

Разрезав по образующей отрезанное от трубки кольцо и измеряя изменение диаметра, можно рассчитать остаточные тангенциальные напряжения:

$$\sigma_{\varphi} = E s \Delta D / \left[ (1 - \nu^2) D_{\text{ср}}^2 \right] ,$$

где  $\Delta D$  — изменение наружного диаметра после разрезки кольца;  $D_{\text{ср}}$  — диаметр средней окружности кольца.

Для определения продольных остаточных напряжений из трубы вырезается полоска, параллельная оси, и замеряется возникший прогиб. Продольные остаточные напряжения

$$\sigma_z = 4 E s f / B^2 ,$$

где  $B$  — длина хорды;  $f$  — прогиб полоски.

Этот метод прост и очень удобен. Его недостатком является произвольное предположение о прямолинейном характере распределения напряжений по толщине стенки, что не всегда подтверждается точными методами определения напряжений по толщине стенки. Однако его применение дает возможность оценить влияние различных параметров на остаточные напряжения и организовать процесс наилучшим образом.

Усовершенствуя метод Андерсена — Фальмана, Фокс предложил обтачивать трубу изнутри на разные диаметры и затем разрезать, измеряя каждый раз соответствующее изменение диаметра [5]. Этот метод уже дает возможность определить распределение напряжений по толщине стенки, однако расчет напряжений основывается на произвольной и неподтверждающейся опытом предпосылке об экспоненциальном законе распределения напряжений по сечению стенки. Кроме того, метод требует большого количества образцов, равного числу обточек, что налагает определенные требования на идентичность величин и распределений напряжений. Метод, совершенно аналогичный методу Андерсена — Фальмана, был предложен Сауттером и Грюлем для определения остаточных тангенциальных и продольных напряжений в трубах из алюминиевых сплавов. Для нелинейного распределения напряжений ими же была предложена методика разрезки, обточки наружного слоя и новой разрезки образцов, сходная с методикой Фокса.

Техническая простота метода разрезных колец позволяет его широко использовать на производстве для количественной оценки тангенциальных остаточных напряжений в трубах, в частности латунных, совместно с химическими методами.

Аммиачная проба выявляет наличие внутренних напряжений, но не дает возможности оценить их количественно. Определение величины внутренних напряжений может быть произведено способом



разрезания колец по образующей и замеров их наружного диаметра до и после разреза, как это показано на рис. 11.

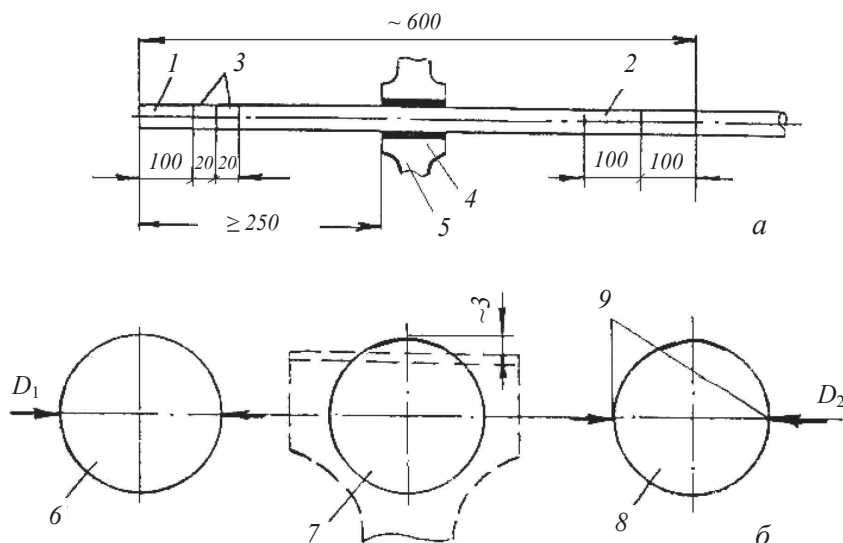


Рис. 11. Изготовление образцов для испытаний конденсаторных трубок аммиачной пробой и методом разрезания колец:

*a* — вырезка образцов; *б* — разрезание кольца; 1, 2 — образцы для аммиачной пробы; 3 — образцы для пробы методом разрезания колец; 4 — свинцовые или алюминиевые накладки; 5 — тиски; 6 — замер; 7 — разрезание кольца; 8 — замер; 9 — место нанесения метки

Подготовка образцов выполняется по следующим правилам. Одновременно с образцами, которые будут подвергнуты аммиачной пробе, отрезаются образцы для испытания методом разрезания колец. Подготовка образцов выполняется тщательно, как и образцов для аммиачной пробы. Образцы маркируются карандашом, а на одном из торцов каждого образца наносится напильником легкая диаметральная риска, в направлении которой затем следует производить замеры диаметров  $D_1$  и  $D_2$  (рис. 11).

Замеряется микрометром диаметр  $D_1$ , затем образец слегка зажимают в тиски, на губки которых установлены свинцовые накладки толщиной 3...5 мм, и ручной ножовкой разрезают по образующей. Работа проводится тщательно, избегая деформации образца при зажатии его в тиски и разрезании, так как это может сильно исказить данные испытания.

Внутренние тангенциальные напряжения стремятся развернуть или свернуть разрезанный образец, поэтому его диаметр  $D_2$ , замеренный в том же месте, что и ранее, будет больше (в случае растягивающих напряжений на наружной поверхности трубы) или меньше, чем  $D_1$ .

Величина окружных остаточных напряжений на наружной поверхности трубы, МПа, определяется по формуле:

$$\sigma_{\varphi} = K(D_1 - D_2),$$

где  $K = \frac{E \alpha \delta (3 \bar{D}^2 + \delta^2)}{3 \bar{D}_2 D_1}$ ;  $E$  — модуль упругости (для латуни  $E =$

$= 1,06 \cdot 10^5$  МПа);  $\alpha = \frac{1}{1 - \mu^2}$  — постоянная Пуассона;  $\delta$  — толщина стенки

трубы, м;  $\bar{D} = D_1 - \delta$  — средний диаметр трубы до разрезки, м.

На практике широко используется рекомендация: если внутренние напряжения металла образца больше 20 МПа и при этом на образцах, отрезанных от той же трубки, выявлены трещины, то подобные трубки можно устанавливать в конденсатор только после отжига и повторной проверки на наличие остаточных напряжений.

В промышленном применении метод разрезки колец нацелен на определение поверхностных окружных напряжений в стенке трубы. Положительные значения  $\sigma_{\varphi\varphi}$  соответствуют напряжениям растяжения, отрицательные — сжатия. Однако при таком использовании этого метода нет возможности описать распределение напряжений в объеме трубы и определить продольные  $\sigma_{zz}$  и радиальные  $\sigma_{rr}$  остаточные напряжения.

Для определения всего поля остаточных напряжений в стенке трубы после завершения цикла ее обработки можно воспользоваться модифицированной методикой расчета компонентов тензора напряжений, предложенной и запатентованной авторами [71]. Из решения осесимметричной задачи теории упругости для остаточных напряжений в трубах получены формулы расчета радиальных  $\sigma_{rr}$ , тангенциальных  $\sigma_{\varphi\varphi}$  и осевых  $\sigma_{zz}$  остаточных напряжений:

$$\sigma_{rr} = -a_0 (R_1 - r)(r - R_2); \quad (15)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = a_0 \left[ (r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2) \right]; \quad (16)$$

$$\sigma_{zz} = a_0 \mu \left[ 2(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2) \right], \quad (17)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  — соответственно наружный и внутренний радиусы сечения трубы;  $r$  — радиальная координата;  $r \in [R_1, R_2]$ ;  $\mu$  — коэффициент Пуассона материала трубы.

Параметр  $a_0$  зависит от технологических условий изготовления трубных изделий и может быть определен из формулы (16) для экспериментально найденного тангенциального остаточного напряжения  $\sigma_{\varphi\varphi}^*$  на внешней поверхности трубы, то есть при  $r = R_1$ .

$$a_0 = \frac{\sigma_{\varphi\varphi}^*}{R_1^2 (1 - \bar{R})},$$

где  $\bar{R} = R_2/R_1$  — безразмерный параметр, характеризующий относительную толщину стенки трубы.

После подстановки значения  $a_0$  в формулы (15), (16) и (17) получают распределение главных остаточных напряжений в объеме.

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= -\frac{\sigma_{\varphi\varphi}^* (R_1 - r)(r - R_2)}{R_1^2 (1 - \bar{R})}; \\ \sigma_{\varphi\varphi} &= \frac{\sigma_{\varphi\varphi}^* \left[ (r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2) \right]}{R_1^2 (1 - \bar{R})}; \\ \sigma_{zz} &= \frac{\sigma_{\varphi\varphi}^* \mu \left[ 2(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2) \right]}{R_1^2 (1 - \bar{R})}. \end{aligned}$$

Предложенный способ использован для определения технологических остаточных напряжений в тонкостенных циркониевых холоднодеформированных трубах, которые применяются для каналов водо-водяных и кипящих атомных реакторов. В лаборатории ОАО «Чепецкий механический завод» с применением автоматического дифрактометрического комплекса определены экспериментальные значения тан-

генциальных остаточных макронапряжений на поверхности холодно-катаной трубы из сплава Э125 с внешним и внутренним диаметрами трубы 88 и 79,5 мм, что соответствует  $\bar{R} = 0,9$ , которые составляют + (68...116) МПа. Коэффициент Пуассона принят равным  $\mu = 0,34$ . Ниже приведены результаты расчета остаточных напряжений в трубе с внешним и внутренним радиусами 44 и 39,75 мм соответственно для экспериментально определенного  $\sigma_{\text{фф}} = 116$  МПа (табл. 2).

Таблица 2

Результаты расчета остаточных напряжений в трубе

$r$ , мм	$\sigma_r$ , МПа	$\sigma_z$ , МПа	$\sigma_{\text{ф}}$ , МПа
39,75	0	-35,63	-104,79
40,5	-1,62	-24,59	-70,71
41,25	-25	-12,61	-34,54
42	-2,79	0,31	3,72
42,75	-2,32	14,19	44,08
43,5	-1,16	29,02	86,53
44	0	39,44	116

В данном случае основной проблемой следует считать определение поверхностного тангенциального остаточного напряжения  $\sigma_{\text{фф}}^*$  методом разрезных колец. По результатам замера деформации продольно разрезанного кольца, вырезанного из трубы, нельзя судить о величине напряжения в поверхностных слоях, поскольку деформация кольца является результатом уравнивания всей эпюры тангенциальных остаточных напряжений.

Следует учитывать, что при симметричном распределении тангенциальных напряжений (см. рис. 11, в) кольцо после продольной разрезки может сохранять диаметр, хотя в поверхностных слоях трубы могут присутствовать достаточно высокие напряжения как сжатия, так и растяжения. Наконец, даже правильный замер поверхностных тангенциальных касательных напряжений не дает представления о стойкости металла против МКК, поскольку решающее влияние на раскрытие микротрещин оказывают главные напряжения, определить которые кольцевой пробой принципиально невозможно.

В физически обоснованном методе разрезных колец предусматриваются, кроме вырезки и разрезки по образующей кольца испытываемой трубы, стравливание или механическое удаление поверхност-

ных слоев металла [7]. При этом следует учитывать дополнительные окружные напряжения, возникающие при вырезке кольца, при разрезке кольца вдоль образующей и при стравливании (механическом удалении) всех предыдущих слоев. После разрезки или снятия слоя в рассматриваемой точке тела изменяются остаточные напряжения. Эти изменения связаны с тем, что на обнажаемых поверхностях как бы прикладываются обратные остаточные напряжения, вызывающие изменение напряженного состояния во всех точках оставшейся части кольца. В методе Н. Н. Давиденкова производится отрезка достаточно длинного участка трубы  $l$ , что дает возможность при  $l > 12\sqrt{R_{\text{ср}}S}$ , где  $R_{\text{ср}}$  — средний радиус стенки трубы, пренебречь дополнительными окружными напряжениями, возникающими в результате отрезки трубы, и остается учесть только дополнительные напряжения от продольной разрезки и от удаления слоев. Однако конечное выражение для расчета  $\sigma_{\text{фф}}$ , полученное Н. Н. Давиденковым, трудно использовать на практике, так как для определения интегрируемых функций требуется многократное последовательное удаление слоев металла с цилиндрических поверхностей образца трубы. Возникают сложно решаемые проблемы удаления слоев без нарушения геометрии трубы, что является источником дополнительных ошибок в определении остаточных тангенциальных напряжений даже в тонком поверхностном слое.

Учитывая отмеченную неопределенность при экспериментальном нахождении  $\sigma_{\text{фф}}^*$  методом разрезных колец, систему уравнений  $\sigma_{ii}$  целесообразно преобразовать для обеспечения возможности использования в качестве исходной экспериментальной информации значения продольного (осевого) остаточного напряжения  $\sigma_{zz}^*$  на наружной поверхности трубы. Для определения этого напряжения может быть применен метод стравливания, хорошо зарекомендовавший себя при замере остаточных напряжений в сечении прутков и проволоки [37].

Возможны следующие варианты распределения продольных остаточных напряжений в стенке трубы (см. рис. 12): на наружной поверхности трубы — растягивающие напряжения, а на внутренней — сжимающие (см. рис. 12, *а*); на наружной поверхности — сжимающие, на внутренней — растягивающие напряжения (см. рис. 12, *б*); на обеих поверхностях растягивающие напряжения, в центральных слоях стенки — сжимающие (рис. 12, *в*); на обеих поверхностях сжимающие напряжения, а внутри стенки — растягивающие.

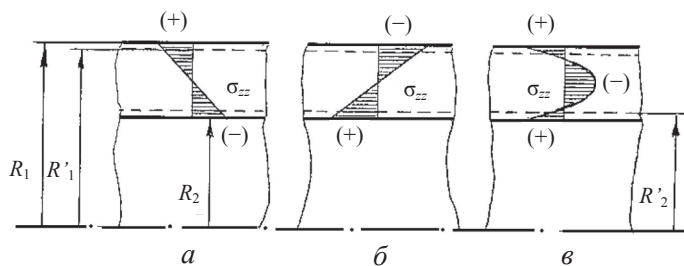


Рис. 12. Варианты возможного распределения осевых остаточных напряжений в стенке трубы

Аналогичная ситуация по распределению тангенциальных остаточных напряжений. Радиальные напряжения в стенке трубы, как правило, являются сжимающими, за исключением случаев специальной обработки.

Если стравливается наружный поверхностный слой трубы и радиус ее меняется с  $R_1$  до  $R'_1$  (см. рис. 12), то происходит некоторая разгрузка трубы по остаточным напряжениям и длина образца трубы изменяется на величину  $\Delta l$ . При этом положительное значение  $+\Delta l$  соответствует удлинению образца и наличию в поверхностном слое положительных (растягивающих) напряжений  $\sigma_{zz}^*$ . Если  $\Delta l$  отрицательно, то образец укорачивается, что означает наличие в поверхностном слое отрицательных (сжимающих) напряжений  $\sigma_{zz}^*$ , которые после замера радиуса  $R'_1$  и длины образца  $l + \Delta l$  после завершения травления могут быть определены по формуле:

$$\sigma_{zz}^* = E \frac{\Delta l}{l} \cdot \frac{R_1'^2 - R_2^2}{R_1^2 - R_1'^2}, \quad (18)$$

где  $R'_1$  — радиус наружной поверхности трубы после стравливания слоя толщиной  $R_1 - R'_1$ .

При стравливании слоя металла с внутренней поверхности внутренний радиус увеличивается с  $R_2$  до  $R'_2$ . Образец трубы также изменяет длину на  $\Delta l$ , и величина остаточного продольного напряжения во внутреннем поверхностном слое определяется по формуле

$$\sigma_{zz}^{**} = E \frac{\Delta l}{l} \cdot \frac{R_1^2 - R_2'^2}{R_2'^2 - R_2^2}, \quad (19)$$

где  $R'_2$  — радиус внутренней поверхности трубы после стравливания слоя толщиной  $R'_2 - R_2$ .

Найденные значения  $\sigma_{zz}^*$  или  $\sigma_{zz}^{**}$  являются усредненными в объеме стравливаемого слоя. Поэтому о величине поверхностных напряжений можно судить только при малой толщине стравливаемых слоев металла. Однако при уменьшении величины  $R_1 - R'_1$  или  $R'_2 - R_2$  возникают технические проблемы точного замера диаметров и удлинения трубы.

Для расчета поля напряжений в объеме стенки трубы используем экспериментально найденное значение  $\sigma_{zz}^*$  из уравнения (17) и определим при  $r = R_1$

$$a_0 = \frac{\sigma_{zz}^{**}}{\mu R_1^2 (1 - \bar{R})}, \text{ или при } r = R_2 \ a_0 = \frac{\sigma_{zz}^{**}}{\mu R_1 R_2 (\bar{R} - 1)}$$

и, подставив его в уравнения (15), (16), найдем компоненты тензора напряжений для случая  $R'_1 < R_1$ :

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= -\frac{\sigma_{zz}^* (R_1 - r)(r - R_2)}{\mu R_1^2 (1 - \bar{R})}; \\ \sigma_{\varphi\varphi} &= \frac{\sigma_{zz}^* [(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)]}{\mu R_1^2 (1 - \bar{R})}; \\ \sigma_{zz} &= \frac{\sigma_{zz}^* [2(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)]}{R_1^2 (1 - \bar{R})}, \end{aligned}$$

или для случая  $R'_2 > R_2$

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= -\frac{\sigma_{zz}^{**} (R_1 - r)(r - R_2)}{\mu R_1 R_2 (\bar{R} - 1)}; \\ \sigma_{\varphi\varphi} &= -\frac{\sigma_{zz}^{**} [(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)]}{\mu R_1 R_2 (\bar{R} - 1)}; \\ \sigma_{zz} &= \frac{\sigma_{zz}^{**} [2(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)]}{R_1 R_2 (\bar{R} - 1)}. \end{aligned}$$



Эти формулы для расчета распределений напряжений по экспериментально найденным значениям  $\sigma_{zz}^*$  или  $\sigma_{zz}^{**}$  пригодны для ситуаций, показанных на рис. 12, а и б. В тех же случаях, когда на обеих поверхностях возникают однозначные продольные напряжения (см. рис. 12, в), распределения напряжений  $\sigma_{ii}(r)$  по толщине стенки трубы могут быть получены только в рамках принятых гипотез при удовлетворении условиям равновесия. Когда же напряжения в наружных и внутренних слоях стенки трубы противоположны по знаку, распределения  $\sigma_{zz}(r)$  и  $\sigma_{\varphi\varphi}(r)$  близки к линейным.

Труба диаметром  $20 \times 2$  мм из стали 08X18 Н10 Т после безоправочного волочения подвергнута травлению с наружной поверхности в специальной лабораторной установке. Базовая длина, на которой осуществлено снятие слоя толщиной  $\Delta r = 0,2$  мм, составляла  $l = 1100$  мм. После травления и охлаждения образец трубы удлинился на величину  $\Delta l = 0,12$  мм, что свидетельствует о растягивающих продольных остаточных напряжениях в удаленном слое. Это напряжение, рассчитанное по формулам (18), условно принимается за поверхностное:  $\sigma_{zz|r=R_1} = \sigma_{zz}^* = 185$  МПа;  $\sigma_{\varphi\varphi|r=R_1} = \sigma_{zz}^* / \mu = 617$  МПа. Распределение  $\sigma_{zz}$  и  $\sigma_{\varphi\varphi}$  по толщине стенки трубы показано на рис. 13 (кривые 1).

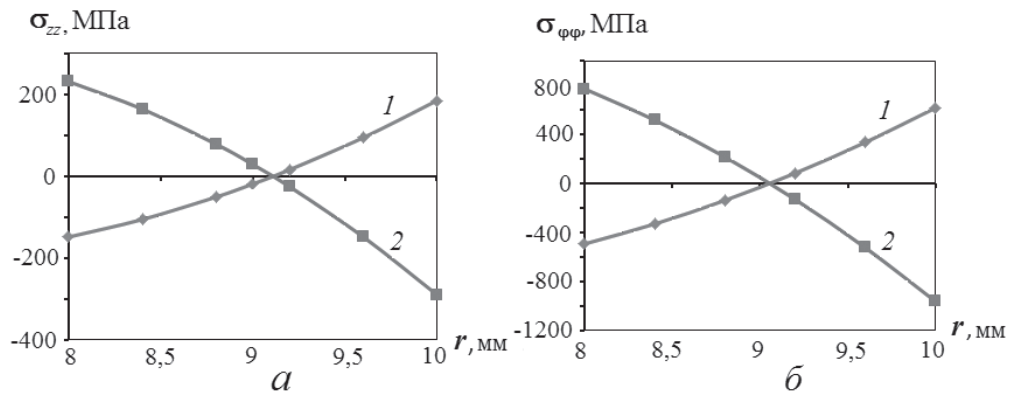


Рис. 13. Распределение напряжений  $\sigma_{zz}$  — а и  $\sigma_{\varphi\varphi}$  — б по толщине стенки трубы

У второго образца трубы, полученной на ХПТР, удален слой металла  $\Delta r = 0,2$  мм с внутренней поверхности. При этом удлинение составило  $\Delta l = 0,135$  мм, что свидетельствует о растягивающих продольных напряжениях  $\sigma_{zz}^{**} = 231$  МПа (в соответствии с формулой (19));  $\sigma_{\varphi\varphi|r=R_2} = \sigma_{zz}^* / \mu = 772$  МПа. На рис. 13 показаны распределения напря-

жений  $\sigma_{zz}$  и  $\sigma_{\varphi\varphi}$  по толщине стенки трубы при растягивающих продольных напряжениях на внутренней поверхности (кривые 2). Полученные распределения напряжений удовлетворяют условиям равновесия продольных сил для  $\sigma_{zz}(r)$  и крутящих моментов для  $\sigma_{\varphi\varphi}(r)$ .

Распределения напряжений  $\sigma_{rr}$  по толщине стенки трубы построены с использованием экспериментально полученных значений  $\sigma_{zz}^*$  и  $\sigma_{zz}^{**}$  и представлены на рис. 14, где отрицательные радиальные напряжения соответствуют случаю стравливания слоя  $\Delta r$  с наружной поверхности (кривая 1), а положительные — стравливанию внутреннего слоя. В обоих случаях  $\sigma_{zz}^*$  и  $\sigma_{zz}^{**}$  положительны, а  $\sigma_{rr}(r)$  меняют знак на противоположный. Естественно, что  $\sigma_{rr}|_{r=R_1} = 0$   $\sigma_{rr}|_{r=R_2} = 0$ .

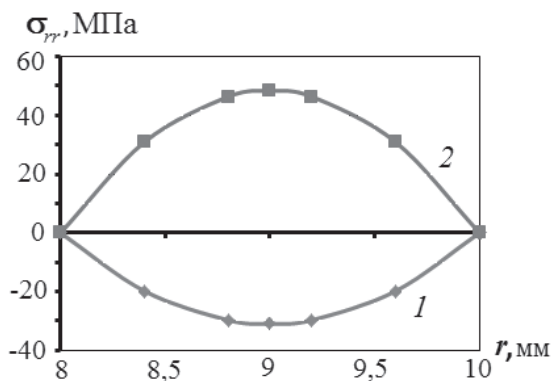


Рис. 14. Распределения  $\sigma_{rr}$  в стенке трубы после волочения (1) и холодной прокатки (2), построенные по экспериментально полученным значениям  $\sigma_{zz}^*$  и  $\sigma_{zz}^{**}$

Когда на поверхностях трубы присутствуют однозначные остаточные напряжения растяжения или сжатия, приходится использовать определенные гипотезы распределения напряжений по радиусу трубы, поскольку истинное распределение определить невозможно ни экспериментально, ни теоретически. Как известно, для материалов кристаллического строения эффективно используется рентгеновская тензометрия [13]. При использовании рентгеновского способа на исследуемое изделие воздействуют рентгеновскими лучами, направленными под разными строго заданными углами. Последующая расшифровка рентгенограмм позволяет рассчитать разность главных напряжений  $\sigma_{11} - \sigma_{22}$  на поверхности или даже каждое из главных напряжений  $\sigma_{11}$  и  $\sigma_{22}$ .

К недостаткам рентгеновского метода относятся его ограниченные возможности вследствие того, что напряжения определяются только на поверхности изделия, то есть невозможно получить полную картину распределения остаточных напряжений по всему объему и, в частности, по толщине стенки трубы. Кроме того, невозможно определить третье главное напряжение  $\sigma_{33}$ , в частности радиальное, поскольку на поверхности это напряжение равно нулю, и оно не влияет на рентгенограмму.

В то же время известно, что по мере удаления от поверхности оно может достигать большой величины, а при оценке прочности труб  $\sigma_{rr}$  играет большую роль. Автор [7] отмечает, что даже при достаточно точном замере углов отражения рентгеновских лучей это не дает уверенности, что полученные результаты могут быть использованы для достаточно точного определения напряжений первого рода.

В практических задачах представляет интерес определение именно макронапряжений, так как только с их помощью может быть проведена оценка влияния остаточных напряжений на эксплуатационные свойства металлоизделий. Все другие экспериментальные методы не дают надежных результатов из-за дополнительных деформаций и искажения формы образцов в процессе механического или химического последовательного удаления слоев металла.

В настоящей работе использована гипотеза параболического распределения остаточных напряжений по толщине стенки трубы, что иллюстрируется схемой на рис. 15.

Напряжения  $\sigma_{zz}^*$  и  $\sigma_{zz}^{**}$  определяются описанным способом, а  $\sigma_{\varphi\varphi}^*$  и  $\sigma_{\varphi\varphi}^{**}$  находятся из уравнений  $\sigma_{\varphi\varphi}(\sigma_{zz}^*)$  и  $\sigma_{\varphi\varphi}(\sigma_{zz}^{**})$  при  $r = R_1$  и  $r = R_2$  соответственно, то есть  $\sigma_{\varphi\varphi}^* = \sigma_{zz}^*/\mu$  и  $\sigma_{\varphi\varphi}^{**} = \sigma_{zz}^{**}/\mu$ .

Распределения напряжений по толщине стенки трубы представлены уравнениями:

$$\sigma_{zz} = a_z r^2 - b_z r - c_z,$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = a_\varphi r^2 - b_\varphi r - c_\varphi,$$

коэффициенты аппроксимации которых находятся из системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ii}^* &= a_i R_1^2 + b_i R_1 + c_i \\ \sigma_{ii}^{**} &= a_i R_2^2 + b_i R_2 + c_i \\ \sigma_{0i} &= a_i r_{0i}^2 + b_i r_{0i} + c_i \end{aligned} \right\}, \text{ где } i = z \text{ или } \varphi.$$

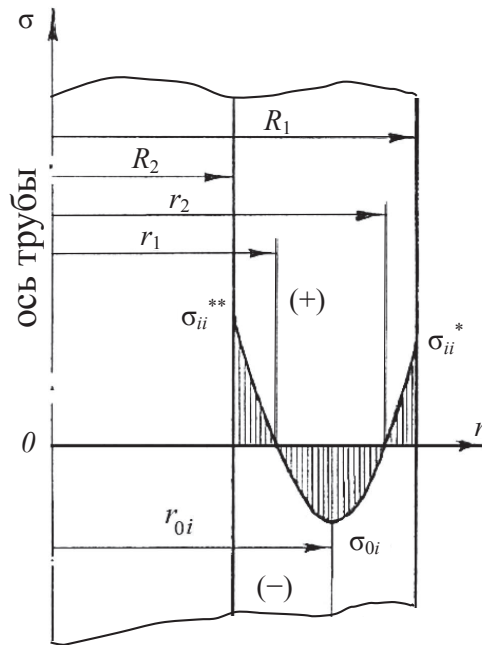


Рис. 15. Расчетная схема распределения остаточных напряжений по толщине стенки трубы при однозначных поверхностных напряжениях

Координаты  $r_{0i}$ ,  $\sigma_{0i}$  определяют положение вершины параболы и определяются при расчете эпюр  $\sigma_{zz}(r)$  и  $\sigma_{\varphi\varphi}(r)$  из условий равновесия остаточных напряжений в объеме трубы. Коэффициенты аппроксимации с точностью до неизвестных координат вершины параболы находятся из выражений:

$$a_i = k_{i1} - b_i k_{i3}; \quad b_i = (k_{i1} - k_{i2}) / (k_{i3} - k_{i4}); \quad c_i = \sigma_{ii}^{**} - a_i R_i^2 - b_i R_i;$$

$$\text{где } k_{i1} = \frac{\sigma_{ii}^{**} - \sigma_{ii}^*}{R_2^2 - R_1^2}; \quad k_{i2} = \frac{\sigma_{0i} - \sigma_{ii}^*}{r_{0i}^2 - R_1^2}; \quad k_{i3} = \frac{R_2 - R_1}{R_2^2 - R_1^2}; \quad k_{i4} = \frac{r_{0i} - R_1}{r_{0i}^2 - R_1^2}.$$

На значения координаты  $r_{0i}$  накладывается условие  $d\sigma_{ii}/dr = 0$ , из которого следует:  $a_{0i} = -b_i/2a_i$ .

Уравнение равновесия напряжений  $\sigma_{zz}$  в поперечном сечении трубы, составленное в соответствии с обозначениями на рис. 14, имеет вид:

$$\int_{R_2}^{r_1} \sigma_{zz}(r) r dr + \int_{r_2}^{R_1} \sigma_{zz}(r) r dr + \int_{r_1}^{r_2} \sigma_{zz}(r) r dr = 0.$$

После интегрирования уравнение равновесия, представленное в форме

$$\frac{a_z}{4}(R_1^4 - R_2^4) + \frac{b_z}{3}(R_1^3 - R_2^3) + \frac{c_z}{2}(R_1^2 - R_2^2) = 0,$$

позволяет найти  $\sigma_{0z}$  последовательными приближениями по  $r_{0z}$ . При этом в качестве первого приближения принято значение

$$r'_{0z} = \frac{R_2 + R_1 \frac{\sigma_{zz}^{**}}{\sigma_{zz}^*}}{1 + \frac{\sigma_{zz}^{**}}{\sigma_{zz}^*}}.$$

В качестве примера рассмотрено построение эпюры  $\sigma_{zz}(r)$  в стенке трубы диаметром 20 мм и толщиной стенки 2 мм, у которой на наружной поверхности продольное остаточное напряжение  $\sigma_{zz}^* = 120$  МПа, а на внутренней  $\sigma_{zz}^* = 60$  МПа. Равновесие продольных сил относительно оси трубы достигается при  $\sigma_{0z} = -50,17$  МПа, а эпюра напряжений описывается уравнением:

$$\sigma_{zz} = 138,5 r^2 - 2464 r + 10903.$$

При этом  $r_{0z} = 8,89$  мм,  $r_1 = 8,29$  мм,  $r_2 = 9,49$  мм. Распределение  $\sigma_{zz}(r)$  для рассмотренного случая графически представлено на рис. 16.

Распределение тангенциальных напряжений  $\sigma_{\varphi\varphi}(r)$  строится при удовлетворении уравнению равновесия моментов окружных сил относительно оси трубы

$$\int_{R_2}^{r_1} \sigma_{\varphi\varphi}(r) r^2 dr + \int_{r_2}^{R_1} \sigma_{\varphi\varphi}(r) r^2 dr + \int_{r_1}^{r_2} \sigma_{zz}(r) r^2 dr = 0.$$

Координаты вершины параболы ( $\sigma_{0\varphi}$ ,  $r_{0\varphi}$ ) находятся аналогичной процедурой из уравнения:

$$\frac{a_\varphi}{5}(R_1^5 - R_2^5) + \frac{b_\varphi}{4}(R_1^4 - R_2^4) + \frac{c_\varphi}{3}(R_1^3 - R_2^3) = 0.$$

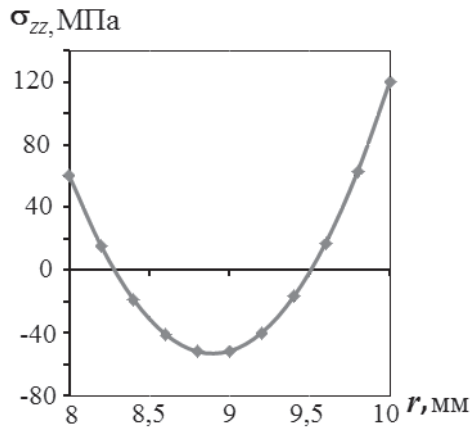


Рис. 16. Распределение продольных остаточных напряжений в стенке трубы при  $\sigma_{zz}^* = 120$  МПа и  $\sigma_{zz}^{**} = 60$  МПа

Первое приближение по  $r_{0\varphi}$  определено выражением

$$r_{0\varphi}' = \frac{R_2 + R_1 \frac{\sigma_{\varphi\varphi}^{**}}{\sigma_{\varphi\varphi}^*}}{1 + \frac{\sigma_{\varphi\varphi}^{**}}{\sigma_{\varphi\varphi}^*}}.$$

Сходимость достигнута при  $r_{0\varphi} = 9,145$  мм и  $\sigma_{0\varphi} = 51,8$  МПа. За исходные экспериментально полученные значения поверхностных тангенциальных напряжений приняты следующие:

$$\sigma_{\varphi\varphi}^* = \sigma_{zz}^* / \mu = 50 \text{ МПа}; \quad \sigma_{\varphi\varphi}^{**} = \sigma_{zz}^{**} / \mu = 80 \text{ МПа}.$$

Графически распределение напряжений  $\sigma_{\varphi\varphi}(r)$  показано на рис. 17.

Предложенная методика позволяет простыми аппаратными средствами и несложной расчетной процедурой определять распределение остаточных напряжений в стенке трубы с точностью, достаточной для технологического проектирования и для анализа существующих технологий производства, в частности, холоднодеформированных труб. Снятие достаточно тонких поверхностных слоев металла и замер приращения длины образцов не представляет больших технических труд-

ностей, а сохранение осевой симметрии обрабатываемых образцов предотвращает дополнительные ошибки, связанные с нарушением геометрии образцов. Кроме того, предложенная методика дает возможность не ограничивать длину образцов, что избавляет от необходимости учитывать концевые эффекты искажения истинных эпюр напряжений и упрощает технику точного замера относительной продольной деформации трубы после снятия поверхностных слоев как снаружи, так и изнутри. Описанная методика показала свою эффективность при совершенствовании технологий производства теплообменных труб из коррозионно-стойких сталей и труб для ТВЭЛов, получаемых короткооправочным волочением, когда растягивающие остаточные напряжения чаще всего возникают на обеих поверхностях трубы.

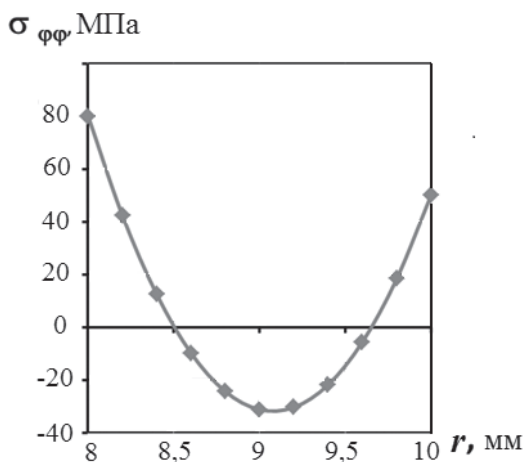


Рис. 17. Распределение тангенциальных остаточных напряжений в стенке трубы при  $\sigma_{zz}^* = 15$  МПа и  $\sigma_{zz}^{**} = 24$  МПа

Аналогичным образом на основании экспериментального замера тангенциального остаточного напряжения  $\sigma_{\phi}^{res}(r)$  по глубине покрытия цилиндрической заготовки авторы работы [72] определяют распределение всех остаточных напряжений по толщине покрытия. Для этой цели необходимо иметь аппроксимацию напряжения  $\sigma_{\phi}^{res}(r)$ , которое, как отмечалось выше, может быть определено опытным путем. В качестве примера рассмотрены характерные экспериментальные данные для компоненты напряжения  $\sigma_{\phi}^{res}(r)$ , возникающего в поверхностно



упрочненном слое цилиндрического образца из сплава ЖС6-КП [73]. Анализ экспериментальных данных показывает, что для аппроксимации этих данных можно использовать соотношение

$$\sigma_{\varphi}^{res}(r) = \sigma_0 - \sigma_1 \exp\left(-\frac{(a-r)^2}{b^2}\right),$$

где  $\sigma_0$ ,  $\sigma_1$  и  $b$  — параметры, подлежащие определению. Обозначим через  $\sigma^*$  экспериментальное значение  $\sigma_{\varphi}^{res}(r)$  при  $r=a$ , а через  $r_0$  — значение глубины слоя  $h=a-r$ , при котором экспериментальные значения  $\sigma_{\varphi}^{res}(h_0) = \sigma_{\varphi}^{res}(a-r_0) = 0$ . Другими словами, экспериментальная зависимость удовлетворяет условиям

$$\begin{aligned}\sigma_{\varphi}^{res} \Big|_{r=a} &= \sigma^*, \\ \sigma_{\varphi}^{res} \Big|_{r=a-r_0} &= 0.\end{aligned}$$

Неизвестные параметры  $\sigma_0$ ,  $\sigma_1$ ,  $b$  найдены численно, при этом значения  $b$  получены из уравнения

$$\exp\left[-\left(\frac{r_0}{b}\right)^2\right] = b\sqrt{\pi} \operatorname{erf}\left(\frac{a}{b}\right) / 2a,$$

где  $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt$  — функция ошибок.

Тогда

$$\sigma_1 = \frac{\sigma^*}{\exp\left[-\left(\frac{r_0}{b}\right)^2\right] - 1}; \quad \sigma_0 = \sigma^* + \sigma_1.$$

Таким образом, предложенное соотношение для аппроксимации  $\sigma_{\varphi}^{res}$  позволило определить численными методами распределение радиальных  $\sigma_r^{res}$  остаточных напряжений по глубине покрытия

$$\sigma_r^{res}(r) = \sigma_0 - \sigma_1 \frac{b\sqrt{\pi}}{2r} \left[ \operatorname{erf}(a/b) - \operatorname{erf}\left(\frac{a-r}{b}\right) \right].$$

Продольные остаточные напряжения ищутся также численно из дифференциальных уравнений равновесия.

### Силовой метод

Иной подход к определению остаточных напряжений, чем в перечисленных механических методах, дает силовой метод, предложенный Д. М. Шуром [48]. Сущность его заключается в следующем: если к деформированному под действием остаточных напряжений образцу приложить внешнюю нагрузку, вследствие чего восстановились бы его размеры и форма, то по величине этой нагрузки можно определить величину и направление остаточных напряжений в данном сечении. Однако применение этого метода часто осложняется из-за трудностей в создании системы внешних сил, эквивалентной действующим в сечении остаточным напряжениям.

В работе [48] дан пример определения силовым методом остаточных касательных напряжений, возникших в результате пластического кручения. После сошлифовки слоя металла и раскручивания образец возвращался в первоначальное положение под действием приложения крутящего момента.

Касательное напряжение рассчитывалось по формуле

$$\tau = \left[ 0,5 / (\pi r^2) \right] dM_b / dr,$$

где  $dM_b/dr$  — находится из зависимости возвращающего момента  $M_b = P_{гр} L$  от радиуса слоя ( $P_{гр}$  и  $L$  — соответственно масса и плечо груза).

Преимущества силового метода: независимость определяемых напряжений от упругих свойств материала и возможность вследствие этого применения метода к материалам, не подчиняющимся закону Гука; отсутствие необходимости точного измерения малых деформаций, возникающих при удалении слоев; простота расчетов. Сравнение результатов, приведенных в работе [48], с результатами, полученными

ми Н. Н. Давиденковым для того же случая пластического кручения, показало хорошую точность силового метода.

Силовой метод или метод нагружения базируется на известной теореме Г. Генки о разгрузке и может быть использован для неразрушающего контроля поверхностных остаточных напряжений, например в трубах [49]. По теореме Г. Генки остаточные напряжения после пластической деформации можно определить в виде разности напряжений в пластическом состоянии и напряжений упругой разгрузки:

$$\sigma_x^{(0)} = \sigma_x^{(p)} - \sigma_x^{(e)}, \quad \sigma_y^{(0)} = \sigma_y^{(p)} - \sigma_y^{(e)},$$

где индексы  $p$  и  $e$  относятся соответственно к пластическому состоянию тела и состоянию упругой разгрузки.

Поле напряжений на поверхности пластически деформируемого изделия в условиях, близких к монотонным, можно определить, используя метод координатных сеток. Зная размеры элементарных ячеек координатных сеток до и после деформации, можно определить величину и направление главных деформаций:

$$\varepsilon_1^{(p)} = \ln \frac{a_1}{a_0}, \quad \varepsilon_2^{(p)} = \ln \frac{b_1}{b_0},$$

где  $a_0, b_0$  и  $a_1, b_1$  — размеры ячеек до и после деформации.

Используя граничное условие (на поверхности нормальное напряжение равно нулю) и условие несжимаемости  $\varepsilon_3^{(p)} = -\varepsilon_1^{(p)} - \varepsilon_2^{(p)}$ , из уравнения состояния можно получить:

$$\sigma_1^{(p)} = 2 \frac{T}{\Gamma} \left( 2 \varepsilon_1^{(p)} + \varepsilon_2^{(p)} \right);$$

$$\sigma_2^{(p)} = 2 \frac{T}{\Gamma} \left( 2 \varepsilon_2^{(p)} + \varepsilon_1^{(p)} \right),$$

где  $\Gamma = 2 \sqrt{\left( \ln \frac{a_1}{a_0} \right)^2 + \ln \frac{a_1}{a_0} \ln \frac{b_1}{b_0} + \left( \ln \frac{b_1}{b_0} \right)^2}$  — интенсивность деформации сдвига;  $T$  — интенсивность касательных напряжений, которую

определяли из обобщенной кривой  $T$ – $\Gamma$ , построенной, исходя, например, из опытов на простое растяжение.

Таким образом, находят величину и направления главных напряжений в любой точке поверхности тела к моменту окончания пластической деформации и начала разгрузки.

Разгрузочные напряжения можно определить следующим образом. Если разгруженное изделие вновь нагрузить некоторой, несколько меньшей внешней нагрузкой, чем при пластической деформации (для предотвращения новой пластической деформации), то тело будет деформироваться упруго. Величину истинных разгрузочных напряжений можно найти, воспользовавшись подобием эпюр напряжений в упругой области

$$\sigma_x^{(e)} = -\sigma_x^{(e')} \frac{P}{P'}, \quad \sigma_y^{(e)} = \sigma_y^{(e')} \frac{P}{P'},$$

где  $P$  — замеренное усилие при пластической деформации;  $P'$  — усилие при определении разгрузочных напряжений;  $\sigma_x^{(e')}, \sigma_y^{(e')}$  — упругие разгрузочные напряжения, соответствующие  $P'$ ;  $\sigma_x^{(e)}, \sigma_y^{(e)}$  — истинные разгрузочные напряжения.

Величина и направление главных напряжений  $\sigma_1^{(e)}, \sigma_2^{(e)}$  определяются с помощью электротензометров, наклеенных на поверхность изделия перед упругим нагружением силой  $P'$ .

При использовании розетки датчиков с углами 45 и 60° получают следующие значения главных напряжений:

а) розетка 45°

$$\sigma_1^{(e')} = -\frac{E}{2} \left( \frac{\varepsilon_1^{(e')} + \varepsilon_2^{(e')}}{1 - \mu} + \frac{1}{1 + \mu} \sqrt{\left( 2\varepsilon_2^{(e')} - \varepsilon_1^{(e')} - \varepsilon_3^{(e')} \right)^2} \right);$$

$$\sigma_2^{(e')} = -\frac{E}{2} \left( \frac{\varepsilon_1^{(e')} + \varepsilon_2^{(e')}}{1-\mu} - \frac{1}{1+\mu} \sqrt{\left( 2\varepsilon_2^{(e')} - \varepsilon_1^{(e')} - \varepsilon_3^{(e')} \right)^2} \right);$$

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2\varepsilon_2^{(e')} - \varepsilon_1^{(e')} - \varepsilon_3^{(e')}}{\varepsilon_1^{(e')} - \varepsilon_3^{(e')}} ,$$

где  $\alpha$  — угол между главным направлением и направлением датчика;

б) розетка 60 °:

$$\sigma_1^{(e')} = -E \left( \frac{\varepsilon_1^{(e')} + \varepsilon_2^{(e')} + \varepsilon_3^{(e')}}{3(1-\mu)} + \frac{\sqrt{2}}{3(1+\mu)} \times \right. \\ \left. \times \sqrt{\left( \varepsilon_1^{(e')} - \varepsilon_2^{(e')} \right)^2 + \left( \varepsilon_2^{(e')} - \varepsilon_3^{(e')} \right)^2 + \left( \varepsilon_3^{(e')} - \varepsilon_1^{(e')} \right)^2} \right),$$

$$\sigma_2^{(e')} = -E \left( \frac{\varepsilon_1^{(e')} + \varepsilon_2^{(e')} + \varepsilon_3^{(e')}}{3(1-\mu)} - \frac{\sqrt{2}}{3(1+\mu)} \times \right. \\ \left. \times \sqrt{\left( \varepsilon_1^{(e')} - \varepsilon_2^{(e')} \right)^2 + \left( \varepsilon_2^{(e')} - \varepsilon_3^{(e')} \right)^2 + \left( \varepsilon_3^{(e')} - \varepsilon_1^{(e')} \right)^2} \right);$$

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{\sqrt{3} \left( \varepsilon_3^{(e')} - \varepsilon_2^{(e')} \right)}{2\varepsilon_1^{(e')} - \varepsilon_2^{(e')} - \varepsilon_3^{(e')}} .$$

Исходя из величин и направлений главных напряжений, по известным зависимостям определяются нормальные и касательные напряжения на любых наклонных площадках.

Определив поля напряжений на поверхности пластически деформированного тела и разгрузочных напряжений, по разности напряжений находят поле остаточных напряжений на поверхности тела после пластической деформации. Таким образом, по данному методу разрушение детали не требуется и в то же время он более точен, чем рентгеновский.

### Метод освобождения

Выше были рассмотрены методы определения остаточных напряжений в деталях простой геометрической формы. Теперь рассмотрим способы, позволяющие определить остаточные напряжения в поверхностном слое деталей сложной конфигурации при помощи проволоочных тензорезисторов.

Сущность способа состоит в следующем. Если в некоторой точке детали сложной конфигурации наклеить два проволоочных тензорезистора в двух взаимно перпендикулярных направлениях и записать их показания, а затем вырезать вместе с тензорезисторами пластинку толщиной  $h$  (не внося дополнительных остаточных напряжений) и снова снять показания тензорезисторов, то разность показаний позволит вычислить деформации  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ , возникшие в результате вырезки пластинок.

Так как после вырезки остаточные напряжения в пластинке отсутствуют, т. е. происходит освобождение пластинки от действия остаточных напряжений, то по значениям  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  можно вычислить остаточные напряжения, действовавшие вдоль направления 1 и 2 до вырезки пластинки. Согласно закону Гука

$$\sigma_1 = -\frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2); \quad (20)$$

$$\sigma_2 = -\frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1). \quad (21)$$

При использовании расчетных зависимостей (20) и (21) предполагается, что напряжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  распределены равномерно по толщине  $h$  вырезанной пластинки, а потому результаты определения этим методом  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  тем точнее, чем тоньше пластинка.

В тонкостенных деталях чаще всего имеет место равномерное распределение остаточных напряжений по толщине. В этом случае для определения остаточных напряжений производится высверливание с помощью трубчатого сверла шайбы с наклеенными тензорезисторами.

Формулы (20) и (21) определяют нормальные остаточные напряжения в двух произвольных взаимно перпендикулярных направлениях. Для определения величины и направления главных напряжений требуется измерить деформации в трех направлениях. Для этого на иссле-

дую поверхность наклеиваются розетки проволочных тензорезисторов в трех направлениях 1, 2 и 3, составляющих друг с другом углы в  $45^\circ$  или  $60^\circ$ . Если обозначить измеренные тензорезисторами деформации, возникшие в результате вырезки пластинки в направлениях 1, 2 и 3, соответственно  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  и  $\varepsilon_3$ , то для главных остаточных напряжений  $\sigma_I$  и  $\sigma_{II}$  можно получить следующие формулы.

Для случая использования розетки тензорезисторов с углами  $45^\circ$  между направлениями 1, 2 и 3:

$$\sigma_I = -\frac{E}{2} \left( \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{1 - \mu} + \frac{1}{1 + \mu} \sqrt{(2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2} \right);$$

$$\sigma_{II} = -\frac{E}{2} \left( \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{1 - \mu} - \frac{1}{1 + \mu} \sqrt{(2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2} \right).$$

Угол  $\alpha$  между главным направлением  $I$  и направлением тензорезистора 1 определяется из соотношения

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}.$$

При использовании розетки тензорезисторов с углами  $60^\circ$  между направлениями 1, 2 и 3:

$$\sigma_I = -E \left( \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{3(1 - \mu)} + \frac{\sqrt{2}}{3(1 + \mu)} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \right);$$

$$\sigma_{II} = -E \left( \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{3(1 - \mu)} - \frac{\sqrt{2}}{3(1 + \mu)} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \right);$$

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{\sqrt{3}(\varepsilon_3 - \varepsilon_2)}{2\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3}.$$

При известных величинах и направлениях главных напряжений можно определить нормальные и касательные напряжения в произ-



вольных площадках, используя известные из теории напряженного состояния зависимости.

В методе освобождения предполагается, что по толщине пластинки напряжения распределены более или менее равномерно. При резком изменении напряжений в поверхностных слоях рассматриваемый метод не дает удовлетворительных результатов.

Одним из наиболее важных является метод освобождения столбиков, согласно которому из тела образца высверливают столбик с наклеенными на торце проволоочными датчиками; глубина сверления должна быть равной  $0,7...1,5$  диаметра столбика для полного освобождения поверхностного слоя [50]. Затем рассчитывают главные остаточные напряжения и определяют их направление. Метод столбиков применяют для определения остаточных напряжений в крупных поковках, отливках и т. п.

Метод отверстий, предложенный Матаром, заключается в сверлении отверстий в детали и замере происходящих деформаций в поверхностном слое вблизи отверстия. Деформации (перемещения) замеряют механическими или проволоочными тензометрами. О. Н. Михайлов в работе [51] приводит экспериментальные данные по влиянию процесса сверления на погрешность метода отверстий и дает эмпирическую формулу для учета этих влияний.

Использование проволоочных датчиков для замера деформаций позволило улучшить классические механические методы Закса и Н. Н. Давиденкова, ибо появилась возможность весьма точно замерять деформации образца при удалении слоев. Примеры применения проволоочных датчиков для замера деформаций механическими методами можно найти в работах многих известных исследователей.

В последнее время появились попытки использовать метод отверстий для замера остаточных напряжений в слоях, лежащих ниже поверхности. Так, Суте и Ванкромбрюгге предлагают непрерывно снимать показания тензодатчиков во время сверления и на основании полученной зависимости деформаций от глубины сверления рассчитывать остаточные напряжения по толщине [12]. Это предложение неверно: в таком случае замеряется не распределение остаточных напряжений по толщине, а определяется минимальная глубина, начиная с которой дальнейшее углубление не будет вызывать заметной деформации на поверхности. Данные, приведенные в работе [12], только подтверждают этот вывод, следующий из работ С. О. Цобкалло

и Д. М. Васильева [50], так как при определенной глубине сверления Суте получил постоянное значение деформации, которое соответствует действительным напряжениям на поверхности. Остальные же значения напряжений — промежуточные, зависящие от глубины сверления.

Идея метода отверстий была предложена Матаром (1932 г.) [7]. Она состоит в том, что в результате сверления отверстия в детали возникают относительные перемещения и деформации, зависящие от величины напряжений, действовавших в месте сверления.

Полоса подвергается растяжению с напряжением  $\sigma$ . После сверления отверстия диаметра  $d$  намечают точки А и В возле краев отверстия и точки  $A_1$  и  $B_1$  на достаточном удалении от него.

После сверления произойдет изменение расстояния АВ, которое удобно определить с помощью измерения отрезков  $AA_1$  и  $BB_1$  механическими тензометрами.

Зная изменения расстояния АВ, можно с помощью специальной тарировки на полосе или расчетным путем определить напряжение  $\sigma$ .

Если остаточное напряженное состояние является плоским, то для его исследования необходимо использовать не менее трех проволочных тензометров.

Теория метода отверстий исходит из предположения, что деформации, возникшие в детали после сверления, являются упругими.

Так как коэффициент концентрации напряжений возле малого отверстия  $k = 3$  для одноосного напряженного состояния (для равномерного двухосного расширения  $k = 2$ ), то остаточные напряжения не должны превышать  $0,3...0,5 \sigma_T$ .

В основе теории метода отверстий лежит известное решение Кирша. Если пластина растягивается в двух главных направлениях напряжениями  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ , то при наличии малого отверстия радиуса  $a$  напряжения в произвольной точке пластинки, характеризуемой расстоянием до центра отверстия  $r$  и углом  $\theta$ , определяются следующими равенствами:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left( 1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2} \right) \cos 2\theta; \\ \sigma_\theta &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left( 1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta; \\ \tau_{r\theta} &= -\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left( 1 - \frac{3a^4}{r^4} + \frac{2a^2}{r^2} \right) \sin 2\theta.\end{aligned}$$

### Радиальная деформация

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E}(\sigma_r - \mu\sigma_\theta) = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2E} \left[ (1 - \mu) - \frac{a^2}{r^2}(1 + \mu) \right] + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2E} \left[ \left( 1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) (1 + \mu) - \frac{4a^2}{r^2} \right] \cos 2\theta.$$

В пластинке без отверстия первоначальные напряжения определяются этими формулами, если считать в них  $a = 0$ . Радиальная деформация в пластинке без отверстия

$$\varepsilon_r^{(0)} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2E}(1 - \mu) + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2E}(1 + \mu)\cos 2\theta.$$

Представляет практический интерес модификация метода отверстий, предложенная в патенте [70], в соответствии с которым в образце выполняют отверстия разной глубины с помощью потока излучения, к которому данный материал непрозрачен. Определяют скорость уноса материалов с поверхности образца в нагруженном и ненагруженном состоянии, по разности скоростей судят о среднем напряжении. О разности главных напряжений судят по эллипсности отверстия.

Предварительно проводят тарировочные испытания путем установления зависимостей первого инварианта тензора напряжений  $\sigma$ , отнесенного к предельному его значению  $\sigma_{\text{пред}}$ , и скорости поверхностного уноса материала  $V$ , отнесенной к ее значению  $V_0$  при нулевых напряжениях.

В зону, ограниченную окружностью, направляют поток излучения, в результате чего образуется глухое отверстие (углубление), а окружность в результате снятия напряжений на свободном контуре приобретает форму эллипса.

Для определения деформаций по периметру окружности закреплены на поверхности тензодатчики, электрически соединенные в мостовую схему. По показанию этих датчиков известным методом легко определить разность между главными напряжениями  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ . Сумму указанных напряжений можно определить по значению глубины отверстия. Зная сумму значений  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  и их разность, легко найти каж-

дое из указанных значений, в том числе максимальное из двух растягивающее напряжение.

Например, пусть необходимо определить остаточные напряжения, образованные при формировании пластины продольно-поперечного формирования органопластиковой нитью (связующее — смола ЭДТ-10). При высверливании отверстия диаметром 5 мм (и снятии по контуру напряжений) главные радикальные деформации  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  на контуре позволяют определить безразмерные напряжения  $\bar{\sigma}_1 = \sigma_1/E$  и  $\bar{\sigma}_2 = \sigma_2/E$  вдоль главных напряжений из соотношений:

$$\varepsilon_{1,2} = -\frac{1+\nu}{2}(\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_2) \pm \frac{3\nu-1}{2}(\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_2),$$

где  $\nu$  — коэффициент Пуассона;  $E$  — модуль Юнга.

Определить разность  $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$  можно достаточно точно по отношению осей эллипса, а для определения непосредственно указанных деформаций необходимо измерить их на некоторой базе в радиальном направлении, что снижает точность, поскольку деформации в радиальном направлении существенно неоднородные. Удаление материала из отверстия путем воздействия излучения позволило определить отношение  $\sigma/\sigma_{\text{пред}}$ . В результате указанных операций были получены следующие данные. На поверхности пластины  $V/V_0 = 1,2$ , что соответствует  $\sigma/\sigma_{\text{пред}} = 0,4$  или величине  $\bar{\sigma} = 0,016$ . Разность деформаций  $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = 0,001$ . При  $\nu = 0,4$  получаем равенство

$$\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_2 = \frac{2}{0,2}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) = 0,01.$$

Таким образом, окончательно  $\bar{\sigma}_1 = 0,013$ ;  $\bar{\sigma}_2 = 0,003$ .

### Метод полосок

Применительно к трубам, пруткам и стержням метод полосок используется для определения продольных остаточных напряжений. На вырезанной, например из стенки трубы, продольной полоске определенной длины проводится последовательное снятие слоев металла (механическим путем или травлением) и измерение прогибов. Иссле-

дование и математическое описание поведения полоски после вырезки и снятия слоев обстоятельно выполнено И. А. Биргером [7].

Полоска длиной  $l$  и шириной  $b$  вырезается из трубы и затем проводится последовательное снятие слоев, параллельных плоскости  $xoz$  (рис. 18). Сечение полоски при этом считается прямоугольным,  $\frac{R_{cp}}{h} \geq 3$  не вносит существенных погрешностей.

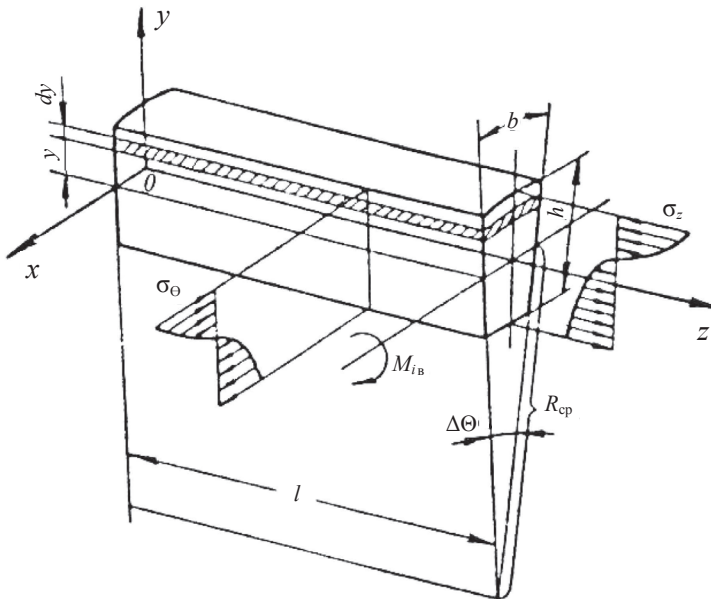


Рис. 18. Деформация полоски после вырезки из тонкостенной трубы

Рассматривают деформацию полоски в результате вырезки из трубы. По освобожденным боковым граням стержня и торцам прикладываются обратные остаточные напряжения. Эти напряжения на торце стержня создают момент

$$M_{i\theta} = - \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_z y b dy.$$

Неизвестные остаточные напряжения  $\sigma_z$  предполагаются положительными (растягивающими). К полоске  $b dy$  приложены обратные

остаточные напряжения, создающие отрицательный момент (положительное направление момента показано на рис. 18). В результате действия момента  $M_{ie}$  возникает прогиб полосы

$$f = \frac{M_{ie} l^2}{8 E J},$$

где  $J = bh^3/12$  — момент инерции сечения.

Вторая часть прогиба полосы после ее вырезки связана с действием обратных остаточных напряжений  $\sigma_0$ .

Вводя условную температурную деформацию  $\alpha t = \mu \sigma_0 / E$ , можно получить следующую зависимость для измерения кривизны стержня:

$$\frac{1}{R_x} = \frac{\mu}{E} \frac{\int_F y \sigma_0 dF}{J}$$

и соответствующий прогиб

$$f_{2e} = \frac{l^2}{8 R_x} = \frac{\mu l^2 \int_F y \sigma_0 dF}{8 E J}.$$

Суммарный прогиб полосы после вырезки

$$f_e = \frac{l^2}{8 E J} \left\{ - \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_z y b dy + \mu \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_0 y b dy \right\}. \quad (22)$$

Эта величина рассчитывается по формуле (22) и в дальнейшем считается известной.

Момент обратных, осевых, остаточных напряжений создает дополнительные напряжения:

$$\sigma_{ze} = \sigma_{ze1} + \sigma_{ze2} = \frac{y}{J} \left\{ - \int_{-h/2}^{h/2} y \sigma_z b dy + \mu \int_{-h/2}^{h/2} y \sigma_0 b dy \right\} - \mu \sigma_0.$$

Учитывая равенство (21), находят

$$\sigma_{z2} = \frac{8E}{l^2} f_e y - \mu \sigma_0.$$

Определяя напряжения на расстоянии  $a$  от наружной поверхности  $y = \frac{h}{2} - a$ , окончательно получим  $\sigma_{z\theta} = \frac{8E}{l^2} f_e \left( \frac{h}{2} - a \right) - \mu \sigma_0$ .

Авторы работы [52] для расчета остаточных напряжений в кольцах, стержнях и полосках предполагают использовать единую формулу:

$$\sigma_k = \frac{2 \left( \Delta M_k - \frac{1}{2} \Delta a_k \sum_{i=0}^{k-1} \Delta P_i \right)}{(h - a_{k-1}) \Delta a_k b}, \quad (23)$$

где  $\sigma_k$  — истинные остаточные напряжения в слое  $\Delta a_k$ ;  $\Delta M_k$  — приращение расчетного изгибающего момента, представляющего разность  $\Delta M_k = M_k - M_{k-1}$ ;  $\Delta a_k$  — толщина  $k$ -го удаленного тонкого слоя;  $a_k$  — толщина всех удаленных слоев;  $h$  — толщина образца;  $b$  — ширина образца;  $\Delta P_i$  — усилие в каждом предыдущем слое от истинных остаточных напряжений;  $i$  — порядковый номер удаленного слоя ( $1 < i < k$ ),  $\Delta P_i = \sigma_i \Delta a_i b$ .

Результаты расчета остаточных напряжений по предлагаемому и ранее известным методам хорошо совпадают, хотя область применения каждого из известных методов строго регламентирована геометрической формой образца (кольцо, стержень и т. д.). Это позволяет сделать заключение, что предложенный метод расчета приемлем для вычисления остаточных напряжений в образцах с разнообразной геометрической формой.

Универсальность рассматриваемого метода объясняется использованием в основной расчетной формуле (23) значения изгибающего момента, действие которого эквивалентно удаленным остальным напряжениям.

В случае затруднений при вычислении расчетного изгибающего момента в сложных образцах (деталях) его можно определить экспериментально.

Метод расчета прост, доступен для широкого круга исследователей. В отличие от известных он позволяет учитывать погрешность в виде остаточных напряжений, внесенных в поверхностные слои образца при последовательном удалении его напряженных слоев.

### Метод стравливания

Используется в основном для определения величины продольных остаточных напряжений в поверхностных слоях проволок и прутков. Од-

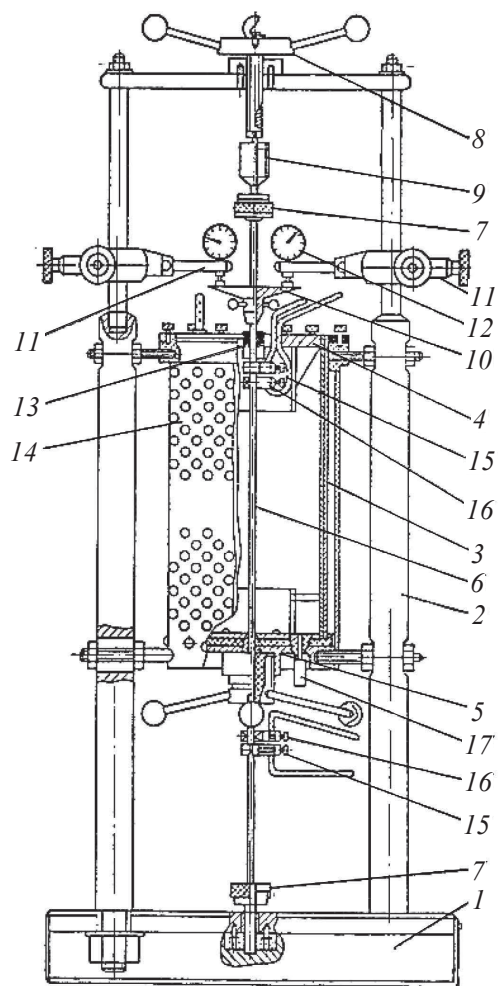


Рис. 19. Установка ЦНИИЧМ для определения остаточных напряжений в стальной проволоке методом электролитического травления [54]

нако он может быть использован и для анализа напряженного состояния в трубах. Травление трубы может осуществляться последовательно для наружной и внутренней поверхностей, что позволяет найти значения предельных поверхностных напряжений как снаружи, так и внутри трубы. Правда до настоящего времени производственные испытания на остаточные напряжения в трубах не поставлены на уровень пригодных и простых методик.

Нашли применение две конструкции установки для стравливания поверхностных слоев проволоки: ВНИИМЕТИЗ и ЦНИИЧМ.

Принцип работы установки конструкции ЦНИИЧМ для определения остаточных напряжений заключается в последовательном электролитическом стравливании с поверхности образца концентрических слоев металла и определении диаметра и длины образца во время травления. Для большей равномерности травления применено автоматическое реверсирование тока [54].



Общий вид установки приведен на рис. 19. На станине 1 установлены две колонны 2, на которых при помощи болтов крепится свинцовый сосуд 3. Последний сверху закрывается крышкой 4, а в днище имеется отверстие, закрываемое пробкой 5. Испытуемый образец 6 закрепляется в захватах 7, электрически изолированных от остальной части установки. Вращением маховика 8 через динамометр 9 образцу сообщается некоторое натяжение. Затем к образцу жестко крепится коромысло 10, на котором устанавливаются при помощи кронштейна 11 два индикатора часового типа 12 с ценой деления 0,001 мм. Электрический ток к свинцовой ванне подается через контактный винт 13. Снаружи свинцовая ванна защищена кожухом с отверстиями 14. Контакты 15 служат для подачи электрического тока к образцу в процессе травления, контакты 16 — для измерения омического сопротивления образца. Через резиновую трубку 17 и отверстие в дне свинцового сосуда нагнетается электролит (10 %-ная серная кислота). В процессе травления, удлиняясь, образец через коромысло 10 давит на часовые индикаторы, по которым производится отсчет удлинения.

Величина остаточных напряжений подсчитывается по формуле Хейна:

$$\sigma_e = E \frac{r_n^2 (l_n - l_0) - r_{n-1}^2 (l_{n-1} - l_0)}{(r_{n-1}^2 - r_n^2) l_0}, \quad (24)$$

где  $\sigma_e$  — остаточные напряжения в слое металла, МПа;  $E$  — модуль упругости, МПа;  $l_0, l_{n-1}, l_n$  — длины образцов;  $r$  — радиус обрабатываемого образца, мм;  $n, n-1$  — индексы, определяющие порядковый номер стравливаемого концентрического слоя металла.

Схема прибора конструкции ВНИИМЕТИЗа для определения продольных остаточных напряжений в тонкой проволоке приведена на рис. 20 [53].

Стравливание поверхности образца проволоки длиной 450 мм, являвшегося одним из электродов, в этом приборе осуществляется в 10 %  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Вторым электродом является сосуд, изготовленный из свинца. В процессе стравливания производится реверсирование тока по следующему режиму: катодный процесс — 5 с, анодный процесс — 2,5 с; плотность тока по сечению проволоки составляла 2,5 А/мм<sup>2</sup>. Концы проволоки экранируются для равномерности стравливания. Значение текущего диаметра проволоки при стравливании определяется по ве-

личине электросопротивления. Одновременно с помощью индикатора фиксируется длина проволоки, соответствующая текущим значениям диаметра.

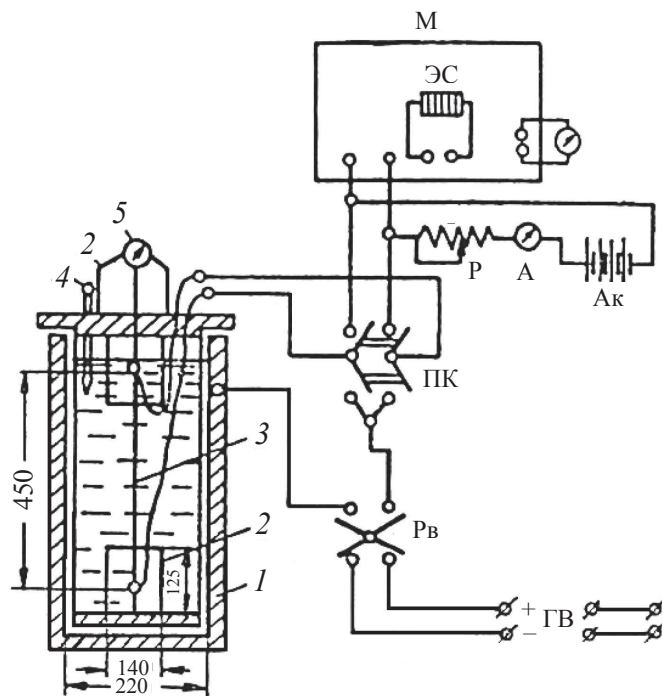


Рис. 20. Схема установки для измерения удлинения и диаметра образца проволоки в процессе электролитического стравливания:

1 — свинцовый сосуд с электролитом; 2 — экраны; 3 — образец проволоки; 4 — термометр; 5 — индикатор;  $P$  — реостат;  $M$  — мост для измерения электросопротивления;  $A$  — амперметр;  $Ак$  — аккумулятор;  $ПК$  — перекидной ключ;  $Рв$  — реверсор;  $ГВ$  — газотронный выпрямитель

Величину и знак осевых остаточных напряжений при использовании обоих методов определяли на основании данных замера текущих диаметров и длины образцов.

После первого стравливания напряжение в поверхности проволоки рассчитывается по формуле:

$$\sigma_1 = \frac{E(l_1 - l_0)d^2}{l_0(d_0^2 - d_1^2)},$$

а после последующих стравливаний — по формуле Хейна (24).

Методы стравливания позволяют определять только предельные остаточные напряжения в проволоке, прутках и трубах. Для определения радиальных и тангенциальных напряжений могут быть применены расчетные процедуры. Например, с этой целью в работе [68] предлагаются следующие выражения для расчета распределения остаточных напряжений по сечению цилиндрических изделий:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{\sigma_z^*}{2\nu} (3r^{-2} - 1); \quad \sigma_r = \frac{\sigma_z^*}{2\nu} (r^{-2} - 1); \quad \sigma_z = \sigma_z^* (2r^{-2} - 1),$$

где  $\sigma_{\varphi}$ ,  $\sigma_r$ ,  $\sigma_z$  — соответственно тангенциальные, радиальные и осевые остаточные напряжения в функции безразмерной радиальной координаты  $r$ ;  $\sigma_z^*$  — осевое поверхностное натяжение, определяемое экспериментально, методом стравливания;  $\nu$  — коэффициент Пуассона.

Судя по описанию примеров реализации предложенного в патенте [69] способа, методы стравливания успешно используются при анализе остаточных напряжений в покрытиях.

В работе [110] авторы описывают модифицированную методику расчета компонентов тензора остаточных напряжений в стенке трубы на основании известных продольных остаточных напряжений  $\sigma_{zz}$ , измеренных методом стравливания. В соответствии с данной методикой с поверхности трубы стравливается слой металла, после чего измеряется величина продольной упругой релаксации трубы  $\Delta l$ . Толщина стравливаемого слоя  $\Delta R$  должна быть с одной стороны не слишком большой, для возможности определения остаточных напряжений в как можно более тонком поверхностном слое, с другой стороны — не слишком малой, для технической возможности фиксации изменения длины трубы после травления.

Если стравливается наружный поверхностный слой трубы и наружный радиус ее меняется с  $R_1$  до  $R'_1$ , то происходит некоторая разгрузка трубы по остаточным напряжениям и длина образца трубы изменяется на величину  $\Delta l$ . При этом положительное значение  $+\Delta l$  соответствует удлинению образца и наличию в поверхностном слое положительных (растягивающих) напряжений  $\sigma_{zz}^*$ . Если  $\Delta l$  отрицательно, то образец укорачивается, что говорит о наличии в поверхностном слое отрица-

тельных (сжимающих) напряжений  $\sigma_{zz}^*$ , которые после замера радиуса  $R'_1$  и длины образца  $l + \Delta l$  могут быть определены по формуле:

$$\sigma_{zz}^* = E \frac{\Delta l}{l} \cdot \frac{R_1'^2 - R_2'^2}{R_1'^2 - R_1'^2}, \quad (25)$$

где  $R'_1$  — радиус наружной поверхности трубы после стравливания слоя толщиной  $R_1 - R'_1$ ,  $l$  — длина рабочей части образца до травления,  $E$  — модуль упругости металла труб.

При стравливании слоя металла с внутренней поверхности внутренний радиус увеличивается с  $R_2$  до  $R'_2$ . Образец трубы также изменяет длину на  $\Delta l$ , и величина остаточного продольного напряжения во внутреннем поверхностном слое определяется по формуле

$$\sigma_{zz}^{**} = E \frac{\Delta l}{l} \cdot \frac{R_1'^2 - R_2'^2}{R_2'^2 - R_2'^2}, \quad (26)$$

где  $R'_2$  — радиус внутренней поверхности трубы после стравливания слоя толщиной  $R'_2 - R_2$ .

Одной из трудностей реализации процесса стравливания является неравномерность травления, которая имеет место в силу того, что образующиеся вблизи поверхности труб продукты травления препятствуют равномерному протеканию процесса. В этой связи было решено применить вращение образца вокруг собственной оси во время травления для обеспечения равномерности стравливания.

Конструкция установки для травления представлена на рис. 21.

Неподвижная часть установки состоит из ванны 1, опирающейся на опоры 2, и стальной ленты, уложенной в ванну. Момент вращения передается образцу 5, закрепленному в захватах 4 через гибкий вал 6 от двигателя. Электрический ток подается от выпрямителя через подшипник 3 на образец 5 и на стальную ленту. Главной особенностью установки является возможность вращения трубы во время травления.

Измеренный образец 5 с предварительно заглушенными торцами и закрепленным подшипником 3 устанавливался в захватах 4 на гиб-

ких валах 6. После этого к подшипнику и стальной ленте подключались контакты и вся подвижная конструкция опускалась в ванну 1, заполненную электролитом. Включался привод вращения образца, замыкалась электрическая цепь и начинался процесс травления. После расчетного времени и снятия слоя нужной толщины измерялись диаметр образца и его длина.

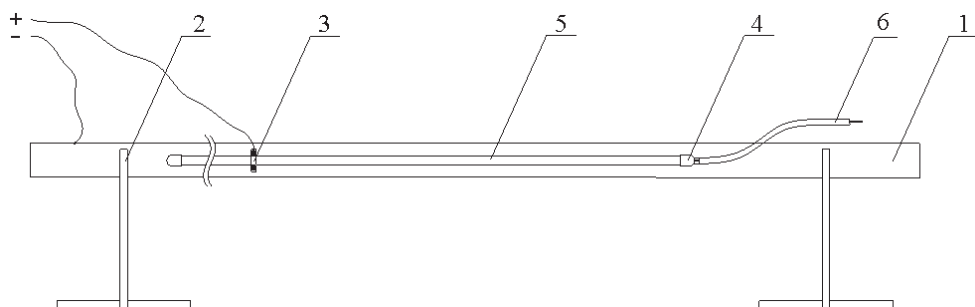


Рис. 21. Схема установки для определения остаточных напряжений в трубах:  
1 — ванна; 2 — опоры; 3 — подшипник; 4 — подвижные захваты; 5 — образец;  
6 — гибкий привод вращения

В случае стравливания слоя металла с внутренней стенки трубы измеренный образец 5 предварительно обматывался изоляцией для гарантированного отсутствия травления наружной поверхности. Далее на образце закреплялся подшипник 3 и изолировались торцы, после чего ход эксперимента продолжался, по аналогии со случаем стравливания наружной поверхности стенки трубы. Из-за сложности точного измерения внутреннего диаметра трубы в этом случае толщина стравливаемого слоя оценивалась исходя из времени травления.

Измерение длины образцов проводилось до и после эксперимента при помощи дилатометра, закрепленного на жесткой раме. После измерения абсолютного удлинения (укорочения) рабочей части образца  $\Delta l$  в результате стравливания поверхностного слоя были рассчитаны продольные остаточные напряжения в стенке трубы  $\sigma_{zz}$  по формулам (25) и (26). Для расчета всех компонентов тензора остаточных напряжений в стенке трубы была применена методика, описанная авторами [110].

Полученные авторами распределения остаточных напряжений в стенке труб  $16 \times 1,5$  из стали 08X18 Н10 Т в состоянии поставки приведены на рис. 22.

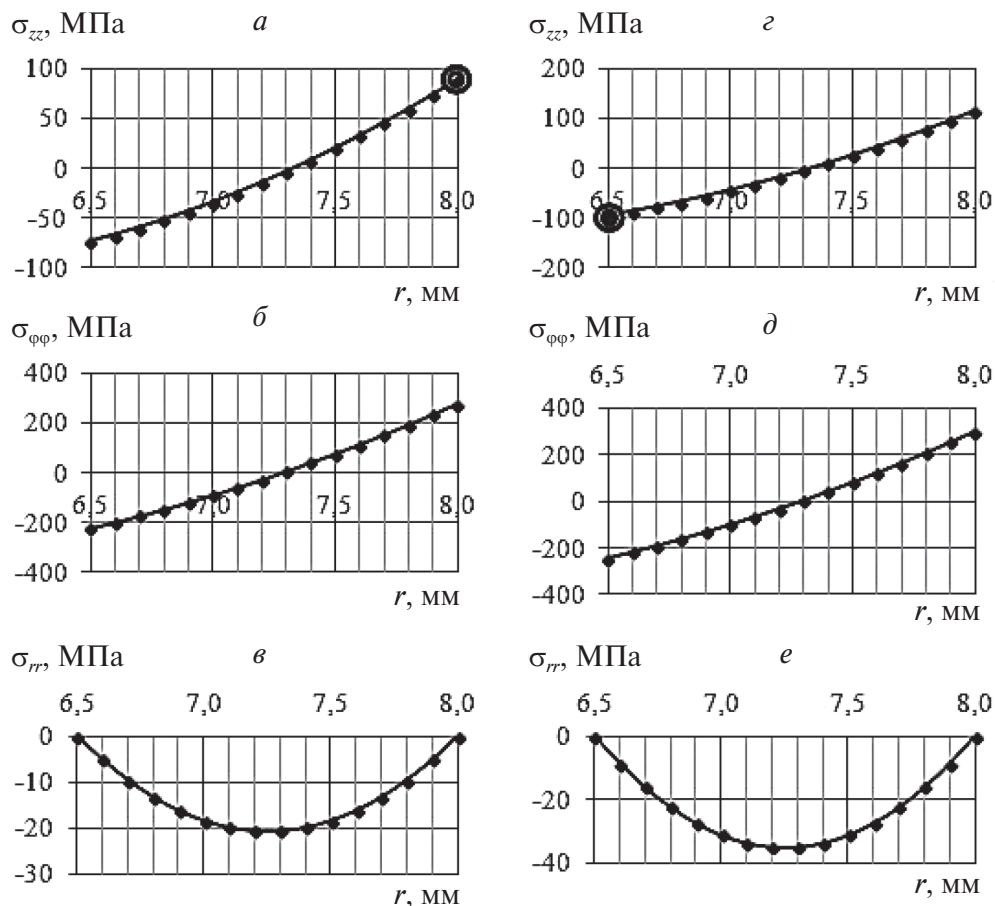


Рис. 22. Распределение остаточных напряжений по толщине стенки труб:  
а, б, в — после стравливания наружного слоя; г, д, е — после стравливания  
внутреннего слоя

На рис. 22 жирной точкой показаны экспериментально найденные значения  $\sigma_{zz}^*$  и  $\sigma_{zz}^{**}$ .

Предложенная методика позволяет простыми средствами и расчетной процедурой определять распределение остаточных напряжений в стенке трубы с точностью, достаточной для технологического проектирования и анализа существующих технологий производства.

### 3.3. Рентгенографические методы определения остаточных напряжений в металлах

Рентгеновский метод определения остаточных напряжений основан на явлении рассеяния монохроматических рентгеновских лучей при прохождении через регулярную кристаллическую решетку материала. При таком рассеянии происходит интерференция лучей, в результате интенсивность лучей увеличивается только в определенных направлениях, тогда как в других направлениях — ослабляется. Для материалов некристаллической структуры (стекло, пластмасса) рентгеновский метод не применим.

В основе рентгеновского метода определения остаточных напряжений лежит формула Вульфа — Брэгга, характеризующая условие «отражения» рентгеновских лучей от атомных плоскостей кристалла:

$$2d \sin \theta = n l, \quad (27)$$

где  $d$  — расстояние между двумя соседними параллельными атомными плоскостями кристаллической решетки исследуемого материала;  $\theta$  — угол падения пучка лучей на плоскость кристаллической решетки материала;  $n$  — целое число (порядок отражения);  $l$  — длина волны рентгеновского излучения.

Рентгеновские лучи, неудовлетворяющие условию (27), взаимно погашаются. Зная угол между падающим и отраженным рентгеновскими лучами, можно вычислить расстояние  $d$  при напряженном состоянии металла. Если известно расстояние между кристаллографическими плоскостями  $d_0$ , то деформация кристаллической решетки

$$e = (d - d_0) / d_0,$$

где  $d_0$  — расстояние между кристаллографическими плоскостями при отсутствии напряжений.

При определенных упругих постоянных материала деформацию его кристаллической решетки можно отождествить с обычной (ма-

кроскопической) деформацией. Значение  $d_0$  определяют с помощью образца, изготовленного из того же материала, что и деталь, в которой изучают остаточные напряжения, и подвергнутого термообработке (отжигу) для снятия остаточных напряжений.

Одна из возможных схем для определения значения  $d$  показана на рис. 23. Монохроматический рентгеновский луч направляется узким пучком на исследуемую поверхность, а отраженные лучи фиксируются на рентгеновской пленке в виде затемненного кольцевого следа. Как следует из рисунка,

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg}(180^\circ - 2\theta) = \operatorname{tg}(2\theta) = R/l,$$

где  $l$  — расстояние от поверхности исследуемого тела до рентгеновской пленки.

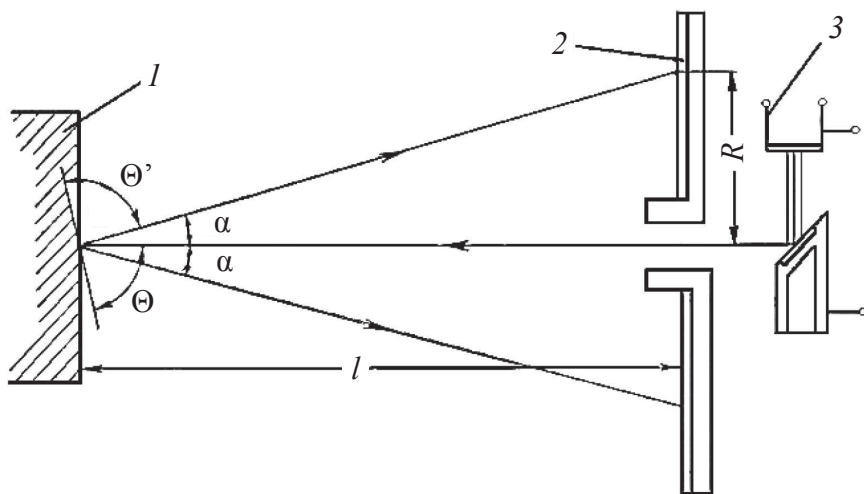


Рис. 23. Принципиальная схема прибора для определения остаточных напряжений рентгеновским методом:

$l$  — поверхность исследуемого тела; 2 — кассета с рентгеновской пленкой;  
3 — источник излучения

Вычислив  $l$  с помощью соотношения (27), можно найти  $d$ . Значение  $R$  определяют по рентгенограмме.

Достоинством рентгеновского метода является то, что он позволяет достоверно оценить остаточные напряжения II и III рода в поверх-



ностном слое детали без ее разрушения. Но при определении остаточных напряжений I рода точность метода невысока. Это объясняется тем, что в отражении рентгеновских лучей участвуют только кристаллы, плоскости которых имеют Брэггов угол с направлением падающих лучей. Лучи, проникая в металл на глубину 3...50 мкм, дают на рентгенограммах или дифрактограммах осредненные по этой глубине значения остаточных напряжений. Для уточнения характера остаточных напряжений на различной глубине необходимо выполнить последовательное травление поверхности детали или образца со снятием рентгенограммы после каждого травления.

Изменения углов  $2\theta$  указывают на присутствие только упругих деформаций (но не пластических). Этот факт важен при расчете внутренних напряжений по результатам измерения  $2\theta$ . Отметим и другие важные характеристики этого метода. С помощью специальных технических приемов могут быть определены деформации на субмикроскопическом уровне путем сравнения межплоскостного расстояния в напряженном и ненапряженном состояниях. Использование других технических приемов позволяет определить деформации из соответствующих измерений напряженного состояния. Следовательно, оказывается возможным изучить внутренние напряжения в объекте без разрезания его на части, с целью нивелировать напряжения (снизить их до нуля). Сильные градиенты напряжений и высоко локализованные напряжения могут быть изучены с помощью рентгеновских лучей, если пучок лучей попадает только на небольшую площадь образца [55].

Из-за ограниченности глубины проникновения в металл рентгеновских лучей метод обнаруживает только деформации на поверхности и на очень небольшой глубине под ней. Поэтому напряженное состояние в данном случае является, как правило, двухосным, так как напряжения, перпендикулярные поверхности, приняты равными нулю на свободной поверхности. При изучении трехосного напряженного состояния, существующего в объеме объекта, применяются специальные технические приемы, с помощью которых представление о величине этих напряжений может быть получено из серий измерений деформаций на поверхности образца, подвергнутого послойному стравливанию, разрезке или шлифовке.

Если метод применим к обычным поликристаллическим металлам, то в случае крупнокристаллических образцов встречаются затруднения, связанные с зернистостью дифракционной картины; эта зерни-

стость может быть уменьшена за счет применения приспособления, качающего образец или пленку. Другие трудности возникают, когда дифрагированные лучи являются широкими и слабыми; такие лучи наблюдаются при дифракции от холоднодеформированных металлов или металлов, находящихся в высокопрочном состоянии. Точность порядка 20 МПа может быть легко достигнута в случае отожденной (мягкой) стали, но при широких дифракционных линиях, получаемых на упрочненной стали, достижение такой точности очень сложно.

Для образцов, в которых имеется градиент напряжений, наблюдаемые  $2\theta$  величины не являются характеристикой поверхности, но представляют средневзвешенные значения для объема, в который проникает рентгеновский луч. Последний может проникать под поверхность на расстояния порядка нескольких сотых миллиметра для материалов на алюминиевой основе при  $\text{Co } K_\alpha$ -излучении или нескольких тысячных миллиметра для стали при  $\text{Cr } K_\alpha$ -излучении. Поверхностное проникновение рентгеновских лучей требует особого рассмотрения с учетом качества подготовки поверхности. На поверхности стального образца после механической обработки, например, могут действовать напряжения, которые отличаются от напряжения во внутренних слоях, причем на величину до  $\approx 400$  МПа, если не удалены нарушенные механической обработкой слои металла химическим или электролитическим способами [55].

Известно, что даже натирание поверхности резиновым ластиком, содержащим абразивные частички, создает напряжения  $\approx 70$  МПа. В стальном образце толщина слоя, который поглощает  $2/3$  дифрагирующей интенсивности  $\text{Cr } K_\alpha$ -излучения, изменяется с углом  $\psi$ . Так, для  $2\theta = 128^\circ$  толщина слоя при  $\psi = 45^\circ$  — 0,0026 мм; для  $2\theta = 156^\circ$  она соответственно составляет 0,0057 и 0,0028 мм. Здесь  $\psi$  — угловая координата эллипсоида деформаций.

Поверхностное проникновение может быть использовано при изучении градиента напряжений (например, когда напряжения возникают от поверхностного шлифования). В стальных образцах, имеющих хорошо приготовленную поверхность, редко напряжения изменяются значительно на расстоянии, отвечающем глубине проникновения рентгеновских лучей; однако если это необходимо, могут быть внесены поправки и в этом случае.

Рентгеновским методом измеряют не только усредненные по объему напряжения в области образца, облучаемого рентгеновским пуч-

ком. Следует обратить внимание на тот факт, что когда полоска металла пластически деформируется при растяжении, а затем разгружается, наблюдаемый сдвиг дифракционных пиков указывает на наличие макроскопических сжимающих напряжений на поверхности или в небольшой области около нее. Эти напряжения не обнаруживаются при других способах определения напряжений, включающих механические методы. Таким образом, удаление некоторого слоя с поверхности образца не вызывает изгиба оставшейся части.

Полагают, что различные факторы определяют этот эффект; в различных материалах эти факторы могут отличаться по степени их значимости. Зерна на поверхности могут иметь более низкий предел текучести, чем зерна, расположенные внутри, и таким образом могут быть пластически деформированы при приложении определенной нагрузки, тогда как зерна внутри образца деформированы упруго. Зерна или субзерна, которые в наименьшей степени искажаются в процессе пластической деформации (или имеют более низкую плотность дислокаций), наиболее важны при определении кажущегося положения дифракционного пика; более размытое распределение от других пиков может быть проигнорировано в оцениваемых положениях пиков. Строение областей зерен около границы или субграницы может отличаться от строения внутренних областей.

Отмеченные выше особенности рентгеновского метода определения напряжений не уменьшают его полезности для практических приложений. Можно, например, рекомендовать применять усредненные данные, полученные при использовании различных длин волн. При этом отмечается большее приближение к значениям истинных макроскопических напряжений, чем в случае измерений по одной длине волны.

### **Расчет остаточных напряжений**

Пусть рентгеновский луч падает под углом  $\psi$  к нормали исследуемой поверхности металла. Если угол отражения  $\theta$  (угол Бреггов) близок к  $90^\circ$ , то с достаточной точностью можно считать, что измеряется расстояние вдоль падающего луча. В этом случае деформация кристаллической решетки в этом направлении

$$\varepsilon_\psi = \frac{d - d_0}{d}.$$

Расстояние  $d$  представляет собой некоторое усреднение для кристаллов данной ориентации, находящихся в пучке лучей, диаметром 1...2 мм в слое глубиной около 20 мкм. Величина  $\varepsilon_\psi$ , вообще говоря, отличается от обычной (макроскопической) деформации материала в заданном направлении. Деформация кристаллической решетки определенным образом связана с действующими на нее механическими напряжениями. Эта связь основана на уравнениях деформации монокристаллов, учитывающих упругую анизотропию.

В практических расчетах применяется приближенный способ, в котором деформация кристаллической решетки отождествляется с обычной деформацией, а напряжения вычисляются по формулам теории упругости. Существенно, что при таких вычислениях используются обычные значения постоянных упругости ( $E$  и  $\mu$ ), свойственные изотропному телу [7].

Наиболее полно определяется сумма главных напряжений в поверхностном слое, когда луч направлен перпендикулярно поверхности металла

$$\sigma_1 + \sigma_2 = -\frac{E}{\mu} \frac{d_1 - d_0}{d_0};$$

в этой формуле  $d_1$  представляет собой расстояние между кристаллографическими плоскостями при направлении рентгеновского луча перпендикулярно к поверхности.

Первоначальное расстояние между соответствующими плоскостями  $d_0$  можно найти, проводя такое же измерение для напряженного слоя (например, для материала в отожженном состоянии).

В большинстве случаев более важно найти не сумму главных напряжений, а напряжение в заданном направлении. Это достигается с помощью съемки (облучения) под углом  $\psi$  к нормали поверхности.

Для использования результатов косой съемки необходимо знать некоторые зависимости теории упругости. Они необходимы также и для расчета остаточных напряжений в общем случае.

При произвольном объемном напряженном состоянии можно найти три главных направления.

Для поверхностного слоя детали (свободной от внешних нагрузок) одно из главных направлений (ему приписывается индекс 3) нормаль-

но к поверхности ( $\sigma_3 = 0$ ). Два других главных напряжения создают двухосное напряженное состояние в поверхностном слое.

Из уравнений упругости (для равномерно нагретого тела) деформации в главных направлениях выражаются следующими равенствами ( $\sigma_3 = 0$ ):

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \frac{1}{E}(\sigma_1 - \mu \sigma_2); \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{E}(\sigma_2 - \mu \sigma_1); \\ \varepsilon_3 &= -\frac{\mu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2).\end{aligned}\tag{28}$$

Пусть падающий рентгеновский луч составляет угол  $\psi$  с нормалью к поверхности и лежит в плоскости, образующей угол  $\varphi$  с координатной плоскостью  $1, 3$  (см. рис. 24).

Углы  $\psi$  и  $\varphi$  представляют собой сферические координаты направления (угол  $\psi$  — широта, угол  $\varphi$  — азимут).

Деформация в этом направлении

$$\varepsilon_{\varphi, \psi} = \varepsilon_1 l^2 + \varepsilon_2 m^2 + \varepsilon_3 n^2,$$

где  $l, m, n$  — косинусы углов, составленных вектором рассматриваемого направления с осями координат соответственно. Легко видеть, что  $n = \cos \psi$ .

Величины  $l$  и  $m$  устанавливаются из геометрических соображений:  $l = \cos \alpha = \cos \varphi \sin \psi$ ;  $m = \cos \beta = \sin \varphi \sin \psi$ . Таким образом,

$$\varepsilon_{\varphi, \psi} = \varepsilon_1 \cos^2 \varphi \sin^2 \psi + \varepsilon_2 \sin^2 \varphi \sin^2 \psi + \varepsilon_3 \cos^2 \psi.$$

Если внести в это равенство соотношения (28), то получим следующую важную формулу:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_1}{E}[-\mu + (1 + \mu) \cos^2 \varphi \sin^2 \psi] + \frac{\sigma_2}{E}[-\mu + (1 + \mu) \sin^2 \varphi \sin^2 \psi]. \tag{29}$$

В дальнейшем окажутся необходимыми некоторые соотношения для плоского напряженного состояния.

В площадке, нормаль которой составляет угол  $\varphi$  с направлением  $l$  (см. рис. 24), действуют нормальное и касательное напряжения

$$\begin{aligned}\sigma_{\varphi} &= \sigma_1 \cos^2 \varphi + \sigma_2 \sin^2 \varphi ; \\ \tau_{\varphi} &= (\sigma_2 - \sigma_1) \sin \varphi \cos \varphi .\end{aligned}\quad (30)$$

Равенство (30) удобно представить в следующем виде:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\varphi .$$

Нормальное напряжение в площадке, нормаль к которой составляет угол  $\varphi + \alpha$  с главным направлением  $l$  (см. рис. 24), будет равно

$$\sigma_{\varphi+\alpha} = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2(\varphi + \alpha) .\quad (31)$$

Для определения остаточного напряжения в произвольном направлении  $\varphi$  необходимо провести две съемки: одну по нормали к поверхности и вторую под углом  $\psi$  к нормали и так, чтобы падающий луч лежал в плоскости, содержащей нормаль и направление  $\varphi$ .

Расстояние между кристаллографическими плоскостями при первой съемке (нормально к поверхности) обозначается  $d_1$ , соответствующее расстояние по второй съемке  $d_{\psi}$ .

Запишем итоговое уравнение (29) в следующем виде:

$$\varepsilon_{\varphi, \psi} = -\frac{\mu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{1+\mu}{E} \sin^2 \psi (\sigma_1 \cos^2 \varphi + \sigma_2 \sin^2 \varphi) .$$

Если учесть, что

$$-\frac{\mu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2) = \frac{d_1 - d_0}{d_0} ;$$

$$\varepsilon_{\phi, \psi} = \frac{d_{\psi} - d_0}{d_0},$$

используя соотношение (29), можно найти

$$\frac{d_{\psi} - d_1}{d_0} = \frac{1 + \mu}{E} \sin^2 \psi \sigma_{\phi}.$$

Величина  $d_0$  мало отличается от  $d_1$ , так как упругие деформации в материале малы. С погрешностью, меньшей 0,1 %, можно положить

$$\frac{d_{\psi} - d_1}{d_0} \approx \frac{d_{\psi} - d_1}{d_1}$$

и тогда

$$\sigma_{\phi} = \frac{E}{(1 + \mu) \sin^2 \psi} \frac{d_{\psi} - d_1}{d_1}. \quad (32)$$

Это и есть расчетная формула для определения нормального напряжения в произвольном направлении. Угол  $\psi$  выбирают обычно в пределах от 45 до 60 ° [7].

В большинстве практических задач можно ограничиться определением остаточного напряжения в заданном направлении.

В некоторых случаях требуется найти величину и направление главных напряжений. Для этого необходимо сделать четыре съемки — одну нормально к поверхности и три другие при различных углах  $\phi$ , но при постоянном угле  $\psi$  (рис. 24).

Выбрав произвольно направление первого косого

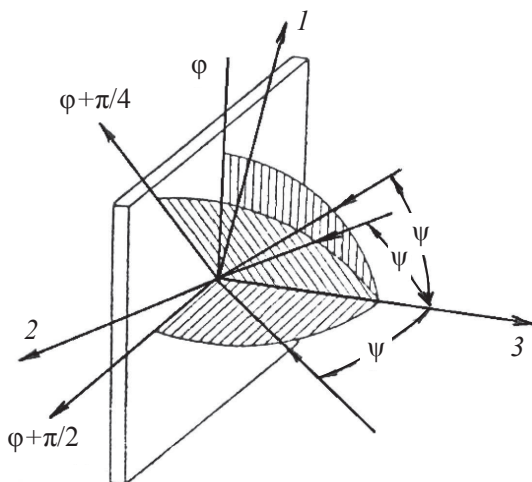


Рис. 24. Определение величины и направления главных напряжений

снимка, целесообразно провести второй под углом  $\pi/2$ , а третий — по биссектрисе угла между ними.

По формуле (32) могут быть вычислены напряжения  $\sigma_\varphi, \sigma_{\varphi+\pi/2}, \sigma_{\varphi+\pi/4}$ . Задача заключается в определении главных напряжений по известным значениям нормальных напряжений в трех направлениях.

Из соотношения (31) для  $\alpha = 0; \pi/2; \pi/4$  будем иметь

$$\begin{aligned}\sigma_\varphi &= \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\varphi; \\ \sigma_{\varphi+\pi/2} &= \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) - \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\varphi; \\ \sigma_{\varphi+\pi/4} &= \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) - \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\varphi.\end{aligned}$$

Из этих уравнений получаем

$$\sigma_\varphi - \sigma_{\varphi+\pi/2} = (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\varphi; \quad (33)$$

$$\sigma_{\varphi+\pi/4} - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) = -\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\varphi. \quad (34)$$

Учитывая равенство

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_\varphi + \sigma_{\varphi-\pi/2}, \quad (35)$$

из соотношений (33) и (34) можно найти:

$$\frac{\sigma_\varphi + \sigma_{\varphi+\pi/2} - 2\sigma_{\varphi+\pi/4}}{\sigma_\varphi - \sigma_{\varphi+\pi/2}} = \operatorname{tg} 2\varphi. \quad (36)$$

Равенство (36) определяет два главных направления, составляющих между собой угол  $\pi/2$ .

При  $\sigma_\varphi - \sigma_{\varphi+\pi/2} = 0$  определение главных направлений лишено смысла; так, в этом случае нормальные напряжения по всем направлениям одинаковы и потому любое направление может быть признано главным.



После вычисления угла  $\varphi$  можно найти разность главных напряжений  $\sigma_1 - \sigma_2$ .

Из уравнения (33)

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\sigma_\varphi - \sigma_{\varphi+\pi/2}}{\cos 2\varphi}.$$

Учитывая соотношение (35), окончательно можно записать

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{1}{\cos 2\varphi} + 1 \right) \sigma_\varphi - \left( \frac{1}{\cos 2\varphi} - 1 \right) \sigma_{\varphi+\pi/2} \right]; \\ \sigma_2 &= \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{1}{\cos 2\varphi} + 1 \right) \sigma_{\varphi+\pi/2} - \left( \frac{1}{\cos 2\varphi} - 1 \right) \sigma_\varphi \right].\end{aligned}$$

Что касается точности рентгеновских методов, то можно отметить, что погрешности, связанные с необходимостью точного измерения угла отражения рентгеновского луча, можно сделать достаточно малыми. Однако это не дает уверенности в том, что полученные результаты могут быть использованы для достаточно точного определения обычных напряжений и деформаций. В практических задачах представляет интерес определение именно макронапряжений, так как только с их помощью в настоящий момент может быть проведена оценка влияния остаточных напряжений на прочность.

Два основных вопроса нуждаются в дальнейшем исследовании: определение действительных значений упругих постоянных при осреднении деформации различных кристаллов и учет пластических деформаций. Это последнее обстоятельство весьма существенно, так как оно связано с большой неоднородностью в условиях деформации отдельных кристаллов и кристаллитов.

Погрешности при определении остаточных напряжений рентгеновским методом могут достигать больших величин: 50...200 МПа. Определение напряжений по глубине поверхностного слоя в 10...20 мк, которое получается в рентгеновском методе, также является в отдельных случаях дополнительным источником погрешностей.

Следует, однако, полагать, что возможность определения остаточных напряжений без разрушения детали является таким значительным преимуществом рентгеновского метода, что указанные его недостатки

будут преодолены. Об этом свидетельствует накопленный опыт предприятий, позволяющий разрабатывать промышленно пригодные методики определения остаточных напряжений. Далее приводится пример такой методики, созданной и применяемой в лаборатории рентгеновской металлографии ОАО «Уралмаш».

### **Методика прецизионного измерения остаточных напряжений в латунных трубках рентгеновским методом**

Латуни Л68 и Л70, содержащие 67...72 % меди, являются однофазными твердыми растворами цинка в меди с кристаллической графцентрированной кубической (ГЦК) решеткой меди. Латуни в наклепанном состоянии или с высокими остаточными напряжениями и содержанием более 20 % цинка склонны к коррозионному растрескиванию.

По требованию технических условий на изготовление труб диаметром 16...25 мм из сплавов Л68, Л70 уровень напряжений на их поверхности не должен превышать 10 МПа. В связи с этим методика съемки на образцах из труб должна обеспечивать точность не выше  $\Delta\sigma = \pm 5$  МПа.

Точность рентгеновского определения напряжений зависит от применяемого рентгеновского прибора и правильного выбора методики съемки. Первое условие — тщательная юстировка прибора. Для правильного выбора методики учитывают следующие факторы: тип рентгеновского излучения, метод съемки, систематические ошибки.

Для прецизионных измерений необходим выбор рентгеновского излучения, которое позволяет получить дифракционные линии, соответствующие большим углам отражения. Они должны быть достаточной интенсивности при низком уровне фона. Возможные варианты съемки медных сплавов при использовании различных излучений приведены в табл. 3.

Конструкция дифрактометра ДРОН-3 ограничивает угол  $\theta$  до значения  $80^\circ$ . На специализированном анализаторе напряжений «Strainflex» съемка осуществляется в диапазоне углов  $\theta = 72..83^\circ$ . Исходя из возможностей дифрактометра ДРОН-3, выполняют съемку в хромовом, медном и кобальтовом излучениях. В хромовом и кобальтовом излучениях  $\beta$ -линии имеют высокий фон, но в кобальтовом излучении они были все же достаточной интенсивности для их анализа. Дифракционные линии (420) $\alpha$  в медном излучении были интенсивными

при низком уровне фона и имели частично разрешенный  $K_\alpha$ -дублет. Таким образом, съемка в медном и кобальтовом излучениях наиболее рациональна.

Таблица 3

## Варианты съемки латуни при прецизионном определении напряжений

Излучение	Дифракционная линия ( $hkl$ )	$\frac{J(hkl)}{J(111)K_\alpha}$	Угол дифракции $\theta$ , град
Cu	(331) $K_\alpha$	56	66
	(420) $K_\alpha$	42	69
Co	(400) $K_\beta$	—	61
	(331) $K_\beta$	—	75
	(400) $K_\alpha$	29	80
Fe	(222) $K_\alpha$	56	66
	(400) $K_\beta$	—	74
Cr	(220) $K_\alpha$	71	61
	(311) $K_\beta$	—	71
	(222) $K_\beta$	—	85

Для измерения деформации кристаллической решетки целесообразно применять  $\sin^2\psi$ -метод, который реализуется как на аппарате ДРОН-3, так и на «Strainflex». По  $\sin^2\psi$ -методу осуществляется съемка при нескольких углах наклона  $\psi$  образца по отношению к падающему рентгеновскому пучку. Расчетная формула имеет вид

$$\sigma = \frac{E}{1+\mu} \operatorname{ctg} \theta_{0^\circ} (\theta_{0^\circ} - \theta_{90^\circ}),$$

где  $E$ ,  $\mu$  — константы упругости материала,  $\theta_{0^\circ}$ ,  $\theta_{90^\circ}$  — углы дифракции при съемке под углами  $\psi_1 = 0$ ,  $\psi_2 = 90^\circ$ .

В этом случае при вычислении напряжений можно использовать как табличные механические, так и рентгеновские упругие постоянные.

Систематические ошибки при определении углов дифракции  $\theta$ , имеющих значения, близкие к  $70^\circ$ , не превышают 0,01 при правильно выбранных условиях съемки. Основными источниками систематических ошибок являются:

- горизонтальная и вертикальная расходимость рентгеновского пучка;
- толщина слоя, участвующего в отражении;
- неточность определения максимума дифракционной линии.

При съемке с цилиндрической поверхности выбор ограничивающих площадь облучения щелей зависит от того, какую составляющую напряжений определяют. При определении осевых напряжений ( $\sigma_0$ ) необходимо уменьшить до минимума вертикальную и горизонтальную щели, для тангенциальных напряжений ( $\tau$ ) — вертикальную щель. Без значительного снижения интенсивности дифракционных линий экспериментально были выбраны следующие размеры щелей:

- для  $\sigma_0$  — вертикальная щель 0,5 мм, горизонтальная щель 4 мм;
- для  $\tau$  — вертикальная щель 0,25 мм, горизонтальная щель 8 мм.

Ошибку, связанную с кривизной поверхности образца и нарушением фокусировки при наклонных съемках, лучше всего определять экспериментально — выполнить съемку с эталоном. Изготавливается «гибкий» эталон из отожженного порошка меди, в котором отсутствуют напряжения. Эталон крепится на образец, принимая форму исследуемой поверхности. По эталону вводились поправки в измеряемые значения напряжений. В табл. 4 приведены данные по съемке эталона на дифрактометре ДРОН-3 при определении тангенциальных напряжений. Максимальная ошибка измерения была на образцах с меньшим диаметром.

Таблица 4

**Результаты определения напряжений в эталонном порошке меди  
на дифрактометре ДРОН-3**

Форма образца	Тангенциальные напряжения $\tau$ , МПа
Плоский	–9,8
Цилиндр диаметром 16 мм	5,0
Цилиндр диаметром 19 мм	–0,7
Цилиндр диаметром 24 мм	0

Толщина слоя, участвующего в отражении, меняется с углом наклона при съемке по  $\sin^2\psi$ -методу. При полуширине дифракционной линии более  $1^\circ$  в углах  $\theta$  необходимо вводить поправку LPA (Лоренца, поляризацию, поглощение) на угловую зависимость. Для выбора способа определения максимума дифракционных линий выполняются два вида съемки: непрерывная запись на ленту самописца с графиче-

ческим определением максимума и регистрация интенсивности по точкам с дальнейшим расчетом по программе «Универсал», по которой вводятся поправки на LPA-факторы и выполняется разделение  $K_{\alpha}$ -дублета на  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  пики.

Регистрируемая в медном излучении линия  $(420)_{\alpha}$  -Fe с полушириной  $1,2...1,3^{\circ}$  в углах  $2\theta$  имела частично разрешенный  $K_{\alpha}$ -дублет. В табл. 5 представлены результаты расчетов по программе «Универсал» и при графическом определении максимума дифракционных линий. Из таблицы видно, что когда  $K_{\alpha_1}$ -пик имеет высокую интенсивность, угол  $2\theta$  по программе «Универсал» не определяется, если был взят уровень аппроксимации  $M = 0,8$ , так как точек для аппроксимации менее трех. Наиболее близкие результаты получились при графическом определении максимума  $K_{\alpha_1}$ -пика и аппроксимации трехточечной параболой.

Таблица 5

**Результаты определения напряжений при нахождении максимума дифракционных линий графически и по программе «Универсал»**

Угол дифракции 2θ, град	Графически	По программе «Универсал»								
		Центр тяжес- ти	Без разделения К <sub>α</sub> -дублета				С разделением К <sub>α</sub> -дублета			
			Аппроксима- ция по ехр		Трехточечная парабола		Аппроксима- ция по ехр		Трехточечная парабола	
			М=0,8	М=0,75	М=0,8	М=0,75	М=0,8	М=0,75	М=0,8	М=0,75
2θ <sub>1</sub> при ψ <sub>1</sub> = 0	138,64	138,86	—	138,57	138,58	138,57	—	138,57	—	138,57
2θ <sub>2</sub> при ψ <sub>2</sub> = 30	138,62	138,97	138,58	138,57	—	138,56	138,58	138,56	138,58	138,56
2θ <sub>3</sub> при ψ <sub>3</sub> = 40	138,61	138,98	138,55	138,53	—	138,54	138,54	138,54	138,54	138,53
2θ <sub>4</sub> при ψ <sub>4</sub> = 45	138,66	139,03	138,55	138,62	—	138,61	138,54	138,63	138,53	138,63
Напря- жение σ, МПа	−2,2	−71,8	—	−9,5	—	−8,7	—	−15,9	—	−13,8
Δσ, МПа	±4	±18,3	—	±28,6	—	±22,7	—	±27,8	—	±32

Так как запись на ленту самописца сокращает время съемки и обработки дифрактометрических данных без снижения их точности, в дальнейших измерениях используется графический метод опреде-

ления максимума дифракционных линий с учетом поправок, полученных при съемке эталона.

Особенность рентгеновского метода определения напряжений состоит в том, что определяемое значение напряжений в изделиях, подвергавшихся пластической деформации, является совокупной величиной макронапряжений и ориентированных микронапряжений. Для их отдельного определения необходимо разгрузить изделие от макронапряжений его разрезкой. Тонкостенные изделия, какими являются исследуемые латунные трубки (толщина стенок 1...1,5 мм), обладают малой жесткостью, поэтому разрезка не должна приводить к дополнительной пластической деформации.

Исследование выполняется на калиброванной трубке из сплава Л68 длиной 250 мм и диаметром 19 мм. Первоначально измерение тангенциальных напряжений проводится в трех точках, расположенных по окружности у края трубки (см. рис. 25). Затем между точками 1 и 3 делалась прорезь длиной 25 мм и шириной 1,5 мм по образующей цилиндра. Вторично измерение выполняется после нанесения второй прорези на расстоянии 7 мм от первой прорези около точки 3. После этого получившаяся узкая полоска металла с исследуемой точкой 3 отрезается от трубки. Разрезки выполняются очень осторожно и не должны приводить к дополнительным пластическим деформациям. Это может подтверждать контроль профиля регистрируемых дифракционных линий, который не должен изменяться при разрезках.

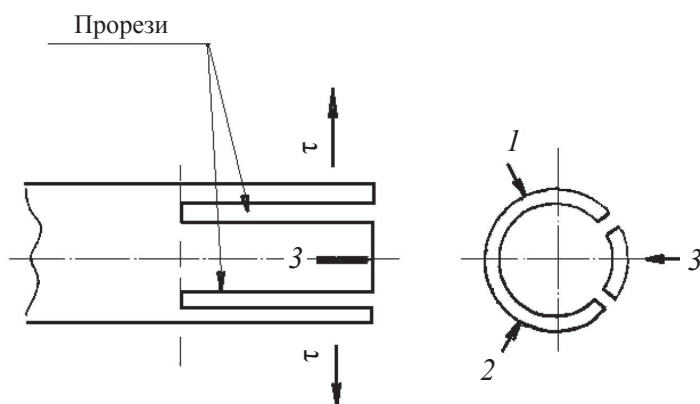


Рис. 25. Схема расположения мест измерения напряжений и нанесения прорезей на латунной трубке

### 3.4. Поляризационно-оптический метод (метод фотоупругости)

---

Это экспериментальный метод определения напряженного состояния деталей и конструкций на прозрачных моделях из оптически чувствительных материалов. Он основан на явлении поляризации света и свойств большинства прозрачных изотропных материалов приобретать под действием нагрузки способность двойного лучепреломления. Поляризованным является свет, в котором направления колебаний световых волн упорядочены. Двойное лучепреломление заключается в том, что при прохождении света через прозрачное кристаллическое тело световая волна разлагается на две взаимно перпендикулярные волны, распространяющиеся внутри кристалла с различными скоростями. Материалы, обладающие таким свойством, называются оптически чувствительными. В изотропных материалах оптическая чувствительность проявляется лишь при их нагружении (стекло, оргстекло, целлулоид, некоторые эпоксидные смолы и др.). Если нагрузку снять, эффект двойного лучепреломления исчезает.

Многочисленными исследованиями установлено, что плоскости колебаний преломленных лучей совпадают с плоскостями главных напряжений. Если лучи света падают перпендикулярно к поверхности пластинки, находящейся в плоском напряженном состоянии, плоскости колебаний преломленных лучей совпадают с направлениями главных напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ . При выходе из пластины (модели) эти два луча на пути  $t$ , равном толщине пластинки, получают разность фаз или линейную разность хода  $d$ .

Закон Вертгейма устанавливает количественную связь между оптическим эффектом и разностью главных напряжений:  $d = ct(\sigma_1 - \sigma_2)$ .

Коэффициент  $c$  зависит от физических свойств материала и длины волны падающих световых лучей. Линейную разность хода  $d$  преломленных лучей и направления главных напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  определяют при просвечивании плоской модели в полярископе.

Различают плоские и круговые полярископы. Плоский полярископ состоит из источника света, поляризатора, анализатора и экрана. Исследуемая модель устанавливается в рабочем поле полярископа между поляризатором и анализатором. Поляризатор служит для поляри-

зации света, идущего от источника. Анализатор, который аналогично поляризатору пропускает световые колебания только в одной плоскости, служит для получения интерференционной картины при совмещении в одной плоскости двух световых волн, выходящих из модели, со сдвигом фаз колебаний.

Если в плоском полярископе за поляризатором и перед ним установить специальные пластинки, создающие сдвиг фаз колебаний световых волн на четверть длины волны, то получится круговой полярископ, в рабочем поле которого имеет место круговая поляризация света. Полярископ дает интерференционную картину в виде черно-белых (при источнике монохроматического света) или цветных (при источнике белого света) полос.

Поляризационно-оптический метод является наиболее совершенным и универсальным из методов моделирования напряженного состояния деталей и конструкций. Моделирование не противопоставляется расчету — оба эти способа взаимно дополняются. Теория моделирования решает вопросы, связанные с выбором вида и параметров модели и с переходом от величин, определяемых на модели, к величинам на натуре. Теоретической основой моделирования является теория подобия, устанавливающая критерии подобия — условия тождественного протекания процессов в модели и реальной конструкции.

Основная задача моделирования при использовании поляризационно-оптического метода — установление областей подобия, закономерностей распределения полей напряжений и деформаций в оптически чувствительных и конструкционных материалах. При решении прочностных задач в случае двухмерной модели используют соотношения:

$$\sigma_{\text{н}} = \sigma_{\text{м}} \frac{L_{\text{м}}}{L_{\text{н}}} \frac{d_{\text{м}}}{d_{\text{н}}} \frac{F_{\text{н}}}{F_{\text{м}}}; \quad u_{\text{н}} = u_{\text{м}} \frac{F_{\text{н}}}{F_{\text{м}}} \frac{d_{\text{м}}}{d_{\text{н}}} \frac{E_{\text{м}}}{E_{\text{н}}},$$

где  $\sigma$ ,  $L$ ,  $d$ ,  $F$ ,  $u$ ,  $E$  — соответственно напряжение, линейный размер, толщина, внешняя нагрузка, перемещение и модуль упругости материала (индексом «м» обозначены величины, относящиеся к модели, индексом «н» — к натурному образцу).



Указанные соотношения справедливы для однородного изотропного материала в пределах области упругих деформаций и при отсутствии в модели отверстий, нагруженных по контуру.

Поляризационно-оптический метод применяется также для исследования объемного напряженного состояния тел, однако эта задача в случае объемного напряженного состояния весьма сложная. Для нахождения напряжений в какой-либо внутренней области объемной модели необходимо выделить эту область так, чтобы по пути прохождения светового луча напряженное состояние в ней практически не менялось, т.е. было плоским. При решении подобных задач чаще всего применяется способ, основанный на использовании свойства оптически чувствительных материалов моделей фиксировать («замораживать») оптический эффект при охлаждении от температур высокоэластичного до температур стеклообразного состояния при сохранении нагрузки. Порядок проведения такого эксперимента следующий: 1) модель помещают в термостат и нагружают заданной системой внешних сил; 2) нагревают модель выше температуры перехода материала в высокоэластичное состояние; 3) выдерживают модель при заданной температуре и медленно охлаждают до комнатной температуры; 4) снимают внешнюю нагрузку и разрезают модель на тонкие срезы (темплеты) толщиной 1...3 мм. Напряжения в плоскости среза определяют измерением оптических величин, как и при исследовании плоских нагруженных моделей. В общем случае для отыскания всех компонентов тензора напряжений в точке необходимо иметь три системы взаимно перпендикулярных срезов, получаемых из трех идентичных «замороженных» моделей.

Оптические методы исследования напряженного состояния тел широко используются для решения различных задач, в том числе в процессе резания металлов, при анализе характера распределения напряжений и коэффициента их концентрации при обработке деталей сложных форм.

Эффективно применение поляризационно-оптического метода при изучении напряжений в зубчатых колесах. При этом используются плоские модели отдельных зубьев и колес в целом, нагружаемые специальными устройствами, и другие методы.

### 3.5. Метод оптически чувствительных покрытий

---

На поверхность исследуемого элемента наносят тонкий равномерный слой оптически активного материала. Модуль упругости его существенно отличается от модуля упругости материала исследуемой детали, вследствие чего материал покрытия работает в упругой области даже тогда, когда материал объекта находится в пластическом состоянии. Применяя основные закономерности явлений, используемых в поляризационно-оптическом методе, можно в любой точке поверхности деформируемого тела определить составляющие тензора деформаций. Деформации поверхности тела передаются покрытию и в нем возникает эффект искусственного двойного лучепреломления. Для замеров разности хода преломленных лучей и определения направлений главных деформаций применяются установки для работы в отраженном свете. Луч от источника света через поляризатор и далее через фотоупругое покрытие попадает на поверхность элемента. Отраженный от поверхности луч света проходит через покрытие, поступает в анализатор и затем падает на экран. По данным просвечивания определяются разности главных деформаций (напряжений) и их направления на поверхности исследуемого элемента. Фотоупругие покрытия дают возможность проводить измерения в заводских и эксплуатационных условиях, в жидких, химически агрессивных и взрывоопасных средах.

### 3.6. Метод голографической интерферометрии

---

Голография — это двухступенчатый метод записи и восстановления волнового фронта, несущего информацию о предмете. Запись волнового фронта основана на явлении интерференции двух когерентных пучков света — предметного и опорного, первый из которых освещает предмет и рассеивается им, а второй создает когерентный фон. Если предметная и опорная волны обладают когерентностью, то разность фаз между ними остается постоянной во времени и создается стационарная интерференционная картина с определенным распределением интенсивностей освещенности. Фотографическую запись этой картины называют голограммой. Основное отличие голограммы от объем-

ной фотографии состоит в том, что в ней регистрируется информация об амплитуде и фазе предметной волны света, тогда как в фотографии регистрируется лишь распределение освещенности. На голограмме полностью отсутствуют элементы, сколько-нибудь напоминающие очертания оригинала. При рассматривании голограммы в микроскоп в простейшем случае можно увидеть лишь систему темных и светлых полос. Для получения изображения предмета голограмму просвечивают, словно диапозитив, только одним опорным пучком света.

Для лучшего усвоения принципа голографической интерферометрии предположим, что голограмма после экспонирования и проявления установлена точно в то же место, где она находилась в момент регистрации. Если теперь, не убирая объекта, осветить голограмму опорным пучком световых лучей, за ней будут одновременно распространяться две волны: рассеянная непосредственно объектом и восстановленная голограммой (копия той волны, которая рассеивалась объектом во время экспонирования голограммы). Эти волны когерентны и могут интерферировать. Зарегистрированная на фотопластинке или фотопленке интерференционная картина называется голографической интерферограммой.

Если происходят какие-либо изменения объекта (например, деформация), обуславливающие фазовые искажения рассеянной им волны, это сказывается на виде наблюдаемой картины (появятся интерференционные полосы). Поскольку при этом интерференционную картину наблюдают одновременно с изменениями, происходящими с объектом, метод голографической интерферометрии называют также методом реального времени.

В другом варианте рассматриваемого метода на одной фотопластинке последовательно регистрируются две голограммы, соответствующие двум состояниям одного и того же объекта. Одновременно восстанавливаясь, две волны, являющиеся голографическими копиями волн, полученных в разное время, интерferируют. Этот вариант метода голографической интерферометрии называется методом двух экспозиций.

Поляризационно-оптический метод в традиционном виде позволяет достаточно точно определить разность и направления действия главных напряжений. Что касается раздельного определения главных напряжений, то, несмотря на обилие различных методов решения задачи, оно остается наиболее трудоемким и наименее точным. Один

из этих методов — разделение напряжений при помощи картин-изопахит (линия разных сумм главных напряжений) — весьма прост. Однако получение этих картин связано со значительными трудностями. Голографическая интерферометрия позволяет достаточно легко построить такую картину. В отдельных случаях голографический интерферометр используется непосредственно для измерения абсолютных разностей хода лучей  $D_1$  и  $D_2$  по направлениям  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  в нагруженной и ненагруженной моделях. Это избавляет от необходимости дополнительной регистрации смещений или суммы главных напряжений. Поскольку природа и способ измерения величин  $D_1$  и  $D_2$  одинаковы, то результаты разделения напряжений более достоверны, а точность их выше, чем при других способах.

Институтом проблем механики УрО РАН предложен способ измерения остаточных напряжений методом зондирующей лунки в сочетании с голографической интерферометрией [56]. Во время первой экспозиции лазерным сканированием записывается голограмма окрестности будущей лунки на поверхности объекта в исходном состоянии, потом создается возмущение поверхности тела высверливанием или травлением лунки. Это позволяет проявиться остаточным напряжениям: изъятие малого объема металла приводит к локальным упругим перемещениям, пропорциональным остаточным напряжениям. Записывается голограмма возмущенной поверхности и накладывается на первоначальную голограмму. Усовершенствованный вариант этого метода получил название спекл-интерферометрии. В отличие от предыдущего способа, требующего применения фотографии, новый способ основан на цифровой записи полученных голограмм, в том числе в динамике и расшифровке их с помощью ЭВМ. Метод применен, в том числе, для измерения остаточных напряжений в латунных втулках подшипников железнодорожных вагонов, что позволило отбраковать изделия с неудачными режимами термической обработки и не допустить аварий на железных дорогах.

Кафедрой оборудования и технологии сварочного производства Южно-Уральского государственного университета предложен метод пенетрации для определения остаточных напряжений. Метод основан на использовании эффекта неравномерного деформирования поверхности тела с остаточными напряжениями при ее локальном упругопластическом контактном взаимодействии с шаровым индентором. При силовом контакте недеформируемого индентора с пластическим по-

луппространством формируется зона выпучивания металла. По ее профилю судят о характере напряжений, используя интерферометрию [4].

Сущность способа определения остаточных напряжений методом зондирующей лунки в сочетании с голографической интерферометрией заключается в следующем. Во время первой экспозиции записывается голограмма окрестности будущей лунки на поверхности объекта в исходном состоянии. Потом создается возмущение поверхности тела (например, путем высверливания или травления малой лунки), что позволяет проявиться остаточным напряжениям: изъятие малого объема приводит к локальным упругим перемещениям, пропорциональным остаточным напряжениям. Далее записывается голограмма возмущенной таким образом поверхности тела. В результате наложения голограмм при их одновременном восстановлении упругие перемещения поверхности в окрестности лунки выявляются в виде интерферограммы. Она наглядна и проста для расшифровки: в случае регистрации нормальной компоненты перемещений (перпендикулярной к исходной поверхности тела) полосы интерферограммы являются линиями уровня, т. е. равных перемещений, отличающихся по высоте на половину длины волны лазерного излучения  $\lambda/2 \approx 0,3$  мкм. Оси симметрии интерференционной картины совпадают с направлениями экстремальных (главных) растягивающих и сжимающих остаточных напряжений. Величина напряжений пропорциональна числу интерференционных полос, причем цена полос зависит от упругих свойств металла и от диаметра и глубины лунки и определяется по графикам, рассчитанным на основании решения трехмерной задачи теории упругости.

Объем необходимых вычислений для получения значений напряжений очень мал, и они могут быть выполнены оператором сразу же при получении и наблюдении интерференционной картины. При этом, в отличие от тензометрирования, данный метод регистрирует линии уровня перемещений по всей области поверхности тела в окрестности зондирующей лунки, что позволяет визуально определять направления главных напряжений и делать качественные выводы о свойствах напряжений еще до подсчета числовых значений соответствующих величин.

Тем самым были созданы основы метода для массовой лабораторной работы по измерению остаточных напряжений. Начались исследования остаточных напряжений в сварных соединениях и отработка режимов сварки стали, алюминия, титана, магния. Вначале работа велась с образцами на лабораторном стенде. Новая методика оказалась

эффективной при отработке технологии электронно-лучевой сварки и локальной термической обработки образцов разного сечения (плоских, тавровых, цилиндрических, сферических) из высокопрочных сталей разных марок и титановых сплавов.

По мере накопления опыта был сделан следующий важный шаг — создан переносной прибор, который работал не только в лаборатории, но и в цехе и на открытом воздухе. С этим прибором в заводских условиях выполнена комплексная программа по отработке режимов сварки и локальной термической обработке титановых крупногабаритных сосудов высокого давления объемом 1000 л, рассчитанных на рабочее давление 300 атм. Разработка новой технологии шла при непрерывном контроле остаточных напряжений. В итоге технология изготовления сосудов была значительно изменена, удешевлена, а качество изделия повышено. Это исследование проводилось в цехах Авиационного научно-технического комплекса им. А. Н. Туполева. С этим же прибором были сделаны первые выезды на строящуюся Курскую АЭС и Астраханский газоперерабатывающий завод, где измерялись сварочные напряжения в реальных конструкциях в трудных климатических условиях. В сотрудничестве с Конструкторским бюро С. А. Лавочкина была усовершенствована технология сварки и режимов термической обработки сварных соединений ряда алюминиевых сплавов, а также выполнена экспертная работа по установлению причин саморазрушения корпуса одного из космических аппаратов во время хранения.

На основе проведенных исследований создано несколько видов портативных голографических систем для измерения напряжений под общим названием ЛИМОН — лазерно-интерферометрический метод определения напряжений, и с помощью этих систем выполнена большая работа, как плановая, так и экспертная, по измерению остаточных напряжений в различных технических объектах на заводах и полигонах. Накопленный опыт использовался при создании каждой следующей измерительной системы [1].

### 3.7. Метод электронной спекл-интерферометрии

Голографический метод оказался удобным, надежным, эффективным, быстрым и интересным в работе. Но процесс записи и обработки голограмм довольно сложен и трудоемок: низкая чувствительность фо-



томатериалов требует экспозиций порядка секунд, мокрая обработка фотопластинок или обслуживание оборудования термопластической записи и визуальное считывание интерферограмм нуждается в специальных навыках операторов. Следует хранить большие массивы информации на фотопластинках или делать с голограмм фотографии.

Современная видео- и вычислительная техника помогла решить некоторые задачи получения, хранения, считывания и обработки голографических интерферограмм, но она же представила и другую возможность. Как появление лазера изменило положение в экспериментальной оптике, так и компактная компьютерная техника вызвала второе большое изменение: фотографический детектор был заменен цифровой видеосистемой с регистрацией в ЭВМ оцифрованной видеоинформации о разных, практически неограниченных по количеству, экспозициях процесса измерения перемещений и дальнейшей обработкой этой информации.

Этот компьютерный метод, называемый электронной спекл-интерферометрией, во многом совпадает с голографической интерферометрией: использование лазера, близкие оптические схемы и по существу те же результаты измерений в виде интерферограмм. Разница состоит в том, что голография фиксирует полную информацию о геометрии тела, в том числе и объем, а спекл-интерферометрия использует электронную фотографию особо тонкой, «зернистой» структуры света, отраженного диффузным объектом при лазерном освещении, — поле спеклов (англ.: spark — искра, вспышка, проблеск; sparkle — сверкать).

Глаза наблюдателя отмечают это в виде чарующего мерцания искорок на участке, освещенном лазером. Детектор — фотопластинка, видеокамера — фиксирует спекл в виде зернистой структуры на изображении. Для голографии спекл является шумом, ухудшающим изображение, но в спекл-интерферометрии это носитель информации, так как спекл-структура зависит от формы поверхности и хорошо отражает ее изменения.

Запись и сопоставление двух спекл-структур, легко проводимые на ЭВМ в цифровой форме, выявляют изменения в положении или геометрии тела в виде такой же системы линий, как и в голографии, т.е. интерферограммы, причем с той же чувствительностью. Уменьшение информативности спекл-интерферограммы, по сравнению с голографической, за счет замены объемной картины на плоскую в рассматриваемом случае несущественно, а методически неоднородный процесс го-

логографической интерферометрии заменяется единым, технологически связанным циклом с более широкими возможностями автоматизации.

Важной особенностью электронной спекл-интерферометрии является то, что можно записать практически неограниченное количество экспозиций и затем брать их произвольные комбинации. Каждое сочетание будет отражать сдвиг объекта между экспозициями. Можно сравнивать кадры не только статического состояния, то также кадры, сделанные во время движения объекта; необходимо только подобрать время экспозиции и время между экспозициями. Соответственно последовательность сочетаний экспозиций покажет движение объекта с субмикронной точностью.

С использованием электронной спекл-интерферометрии была создана система нового поколения для измерения напряжений в упругих телах и конструкциях — ЛИМОН-ТВ, в которой объединены идеи и методы голографической интерферометрии, разработанные ранее для анализа остаточных напряжений, с преимуществами современной компьютерной техники.

Переносная малогабаритная измерительная система изготавливается из доступных комплектующих. В ее состав входят блок интерферометра и компьютерный блок. Блок интерферометра (вес для различных вариантов компоновки около 2 кг) состоит из опорно-юстировочной конструкции и корпуса, в котором монтируется полупроводниковый лазер с длиной волны 640 нм и мощностью излучения 10 мВт, техническая видеокамера с высокой чувствительностью (0,1 люкс) и разрешением 600 телевизионных линий и другие элементы оптической схемы: направляющие зеркала, коллиматор, полупрозрачное делительное зеркало и диффузно рассеивающая пластина, формирующие опорный и предметный световые пучки. Компьютерный блок в мобильном варианте состоит из переносной ЭВМ, имеющей видеовход для подключения обычной видеокамеры. При отсутствии видеовхода в качестве аналого-цифрового преобразователя может быть использовано внешнее устройство типа Cap View, подключаемое к ЭВМ через USB-порт.

### 3.8. Акустические методы

---

В основе акустических методов определения напряжений лежат нелинейные акустические эффекты, возникающие в деформированном теле при распространении и взаимодействии в нем звуковых волн.



Одной из основных причин возникновения таких эффектов являются нелинейные свойства деформированного твердого тела. В частности, скорость поляризованных звуковых волн, распространяющихся в твердом теле, зависит от уровня напряжений, действующих в нем, направления колебаний частиц (поляризации) и направления распространения волн. Данное явление, называемое акустоупругостью, положено в основу рассматриваемого метода анализа напряжений в деталях машин.

Для возбуждения упругих волн обычно используются ультразвуковые излучатели, так как ультразвуковые волны обладают высокой проникающей способностью, практически независимой от агрегатного состояния исследуемых материалов.

Существует много методов измерения скорости ультразвуковых волн. При измерениях время распространения ультразвуковой волны в исследуемой среде сравнивается со временем ее распространения в некоторой эталонной среде. При решении практических задач с помощью акустической тензометрии относительная погрешность измерений не превышает  $3 \cdot 10^{-4}$ .

При изучении ультразвуковым методом неоднородных полей напряжений получают усредненные напряжения на базе, которая определяется размерами измерительных датчиков. Если напряжения изменяются по толщине образцов, получают их усредненные значения.

Рассматриваемый метод является неразрушающим, позволяет измерять остаточные напряжения как на поверхности, так и внутри тела, обеспечивает оперативность контроля, достаточно высокую разрешающую способность и точность. Однако этот метод имеет и недостатки: сложность проведения эксперимента, использование комплекса сложной аппаратуры, ограниченность реализации метода в условиях производства и эксплуатации.

Французские разработчики из фирмы CANTOR COLBURN запатентовали в США метод измерения остаточных напряжений с помощью ультразвука [56]. При этом измеряется время прохождения волны между двумя концами заготовки в нагруженном и ненагруженном состоянии. Расчет напряжений делается на основе сравнения углов наклона нагрузочных диаграмм.

Акустические методы анализа остаточных напряжений были успешно применены для определения напряженного состояния в деформированных металлических композиционных материалах автора-

ми работы [17]. Следует отметить, что опубликованные ранее сведения по изучению остаточных напряжений в композиционных материалах весьма ограничены. Сложность этой проблемы из-за структурных особенностей композитов и трудность определения остаточных напряжений традиционными методами потребовали разработки новых методов исследования, а также модификации существующих. Эти экспериментальные и аналитические методы определения остаточных напряжений имели существенный недостаток: с их помощью невозможно исследовать распределение напряжений по сечению волокнистого композита.

Предложенная авторами работы [17] методика измерения остаточных напряжений акустическим методом позволяет находить величину и распределение таких напряжений по сечению композита с непрерывными волокнами. Эта методика основана на особенностях макроструктуры волокнистых композиционных материалов и позволяет определить осевые остаточные напряжения в волокнах и матрице, которые являются преобладающими и возникают в гетерогенных материалах в процессе изготовления и последующей обработки.

Если жестко закрепить концы образца композита в специальном приспособлении и растворить матричные слои, то оставшаяся система жестко заземленных волокон качественно отразит распределение в них остаточных напряжений.

Чтобы найти величину положительных (растягивающих) остаточных напряжений в каждом  $i$ -м волокне композита, применили принципы, использованные Н. Н. Давиденковым при разработке струнного метода измерения деформаций. Известно, что собственная частота поперечных гармонических колебаний заземленной с торцов струны определяется из уравнения

$$v = \frac{na}{2l} = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}},$$

где  $n$  — порядок гармоники;  $a$  — амплитуда колебаний;  $l$  — длина струны;  $\sigma$  — напряжение;  $\rho$  — плотность материала струны.

Преобразовав это выражение, получили зависимость, связывающую основную частоту поперечных колебаний однородной струны с ее натяжением:

$$\sigma = 4\rho l^2 v^2. \quad (37)$$

В уравнении (37) не учитывается поперечная жесткость натянутого волокна (струны). Жесткость проволоки ( $EL$ ) изменяет частоту собственных колебаний по зависимости:

$$v' = v \left( 1 + \frac{EL}{2\sigma F} + \frac{n^2 \pi^2}{l^2} \right) = v \left[ 1 + \frac{E n^2 \pi^2}{8\sigma} \left( \frac{r}{l} \right)^2 \right], \quad (38)$$

где  $F$  — площадь поперечного сечения волокна;  $E$  — модуль упругости материала волокна;  $I$  — момент инерции;  $r$ ,  $l$  — геометрические параметры волокна.

Решив уравнение (38) относительно  $\sigma$  с учетом выражения (37) получим следующую зависимость:

$$\sigma_0 = 2\rho l^2 v^2 + 2v \sqrt{l^4 \rho^2 v^2 - \frac{1}{8} E \pi^2 \rho r^2} - \frac{E \pi^2}{8} \left( \frac{r}{l} \right)^2. \quad (39)$$

Полное осевое напряжение в волокне ортотропного материала можно найти из уравнения

$$\sigma_{fi}^{\Sigma} = \sigma_{0i} + \Delta\sigma_{\tau i},$$

где  $\sigma_{fi}^{\Sigma}$  — суммарное остаточное напряжение в  $i$ -м волокне;  $\sigma_{0i}$  — конечное остаточное напряжение в  $i$ -м волокне, определяемое по уравнению (37) или (39);  $\Delta\sigma_{\tau i}$  — падение напряжения, связанное с релаксацией и податливостью опор приспособления:

$$\Delta\sigma_{\tau i} = \Delta\sigma_{1\tau i} + \Delta\sigma_{2\tau},$$

здесь  $\Delta\sigma_{1\tau i}$  — падение напряжений в волокне, связанное с релаксацией напряжений;  $\Delta\sigma_{2\tau}$  — падение напряжений из-за податливости опор приспособления ( $\Delta\sigma_{\tau} = \varepsilon_c E_f$ ).

Учитывая, что осевые остаточные напряжения в волокнах уравниваются напряжениями в матрице, т. е. что

$$\sigma'_m(1-V_f) + \sigma_f V_f = 0 ,$$

получили уравнение для определения напряжений в матрице:

$$\sigma'_m = -\frac{\sigma_f V_f}{1-V_f} ,$$

где  $V_f$  — объемная доля волокна;  $\sigma'_m$  — средние по сечению осевые остаточные напряжения в матрице;  $\sigma_f$  — средние по сечению осевые остаточные напряжения в волокне.

Таким образом, для ортотропного композиционного материала система уравнений для определения остаточных напряжений имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{fi}^{\Sigma} &= \sigma_{0i} + \Delta\sigma_{\tau i} , \\ \Delta\sigma_{\tau i} &= \Delta\sigma_{1\tau i} + \Delta\sigma_{2\tau} , \\ \sigma'_m &= -\frac{\sigma'_f V_f}{1-V_f} . \end{aligned} \tag{40}$$

Для уменьшения влияния температурного расширения все подготовительные процессы (установка и закрепление образцов, стравливание матричного слоя) и измерения проводились при комнатной температуре. Кроме того, для компенсации изменения линейных размеров волокон образца детали приспособления изготавливались из материала с равным коэффициентом температурного расширения. Падение напряжения аналогично определяется по формуле (40).

Для измерения частоты собственных колебаний волокон, вытравленных из образцов композитов и имеющих исходные напряжения, использовалась специальная установка (рис. 26). Измерения проводились на основной резонансной частоте с помощью частотомера 2. Момент наступления резонанса определялся по осциллографу 6 с использова-

нием экранированного пьезоэлектрического датчика 4. Управление амплитудой колебания волокна для получения значения резонансной частоты с минимальной ошибкой осуществлялось регулировкой энергии на выходе звукового генератора 1 или пропусканием через образец 7 слабого тока силой 0,01...0,03 А при измерениях напряжений в волокнах из немагнитного материала.

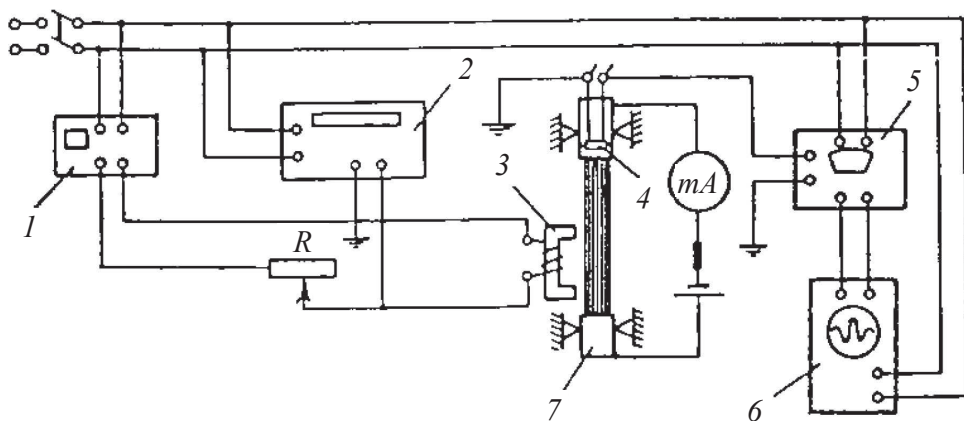


Рис. 26. Схема установки для определения остаточных напряжений в волокнах композиционных материалов:

1 — генератор (типа 3 Г-10); 2 — частотомер (типа Ф-599); 3 — электромагнит возбуждения; 4 — пьезоэлектрический датчик; 5 — усилитель низкой частоты (типа УЧ-2); 6 — осциллограф (типа С1-19); 7 — образец

Волокна в реальном композите имеют случайные отклонения от прямолинейности как следствие технологии изготовления, неравномерности деформации при обработке давлением и других причин. После вытравливания матрицы искривленные волокна заземленного образца дополнительно удлинятся на некоторое значение  $\Delta l_{\text{ф}}$  (фиктивная деформация) в зависимости от степени искривленности. Обработка статистических характеристик неправильностей расположения волокон на основании рентгенограмм плоских образцов композитов алюминий-вольфрам, алюминий-сталь Х18 Н9 Т, полученных горячей прокаткой, и сопоставление параметров искривлений с расчетными, показали удовлетворительную точность аппроксимации искривлений периодической синусоидальной функцией. С учетом искривленности волокон система уравнений для определения осевых остаточных напряжений будет иметь вид:

$$\sigma_{0i} = 2 \rho_i l^2 v^2 + 2 v \sqrt{l^4 \rho_i^2 v^2 - \frac{1}{8} E_f \pi^2 \rho_j r^2} - \frac{E_f \pi^2}{8} \left( \frac{r}{l} \right)^2,$$

$$\sigma_{fi}^{\Sigma} = \sigma_{0i} + \Delta \sigma_{1\tau i} + E_f (\varepsilon_{2\tau} + \varepsilon_{\phi i}).$$

$$\sigma'_m = \frac{\sigma_f V_f}{1 - V_f},$$

где  $\varepsilon_{\phi i}$  — фиктивная деформация волокон вследствие искривлений.

В качестве примера в работе [17] приведены результаты измерения продольных остаточных напряжений по сечению композитов Al-W, Al-сталь X18 Н9 Е с разным числом слоев армирования и диаметром волокон 0,2 мм.

Основные характеристики материалов компонентов приведены в табл. 6. Образцы композитов после отжига при 500 °С и охлаждения в печи подвергались холодной прокатке с суммарным обжатием 6 %.

Таблица 6

#### Характеристики материалов композитов

Компоненты композита	Временное сопротивление $\sigma_b$ , МПа	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Модуль упругости, $E$ , МПа	Коэффициент термического расширения $\alpha$ , град <sup>-1</sup>
АД-1, матрица	63	2,69	$6,9 \cdot 10^4$	$23,9 \cdot 10^{-6}$
W, волокно	2420	19,3	$35,1 \cdot 10^4$	$4,6 \cdot 10^{-6}$
Сталь X18 Н9 Т, волокно	1700	7,87	$19,5 \cdot 10^4$	$11,76 \cdot 10^{-6}$

По результатам рентгеновского анализа были отобраны те образцы, у которых степень искривленности была меньше  $0,1 \cdot 10^{-1}$ . В этом случае поправка на падение напряжений при спрямлении проволоки  $\Delta \sigma_{\phi} = 0$ .

При подготовке к измерению остаточных напряжений образцы закреплялись в массивной металлической раме и производилось стравливание матричных слоев на участке измерения  $l_{\sigma} = 40$  мм. По полученным значениям частоты собственных колебаний волокон производился

расчет остаточных напряжений по формулам (37) и (39). Послойные поля осевых остаточных напряжений, отнесенных к плоскостям армирования, графически представлены на рис. 27. По величине и распределению остаточных напряжений можно судить о характере пластического течения матрицы в процессе холодной прокатки.

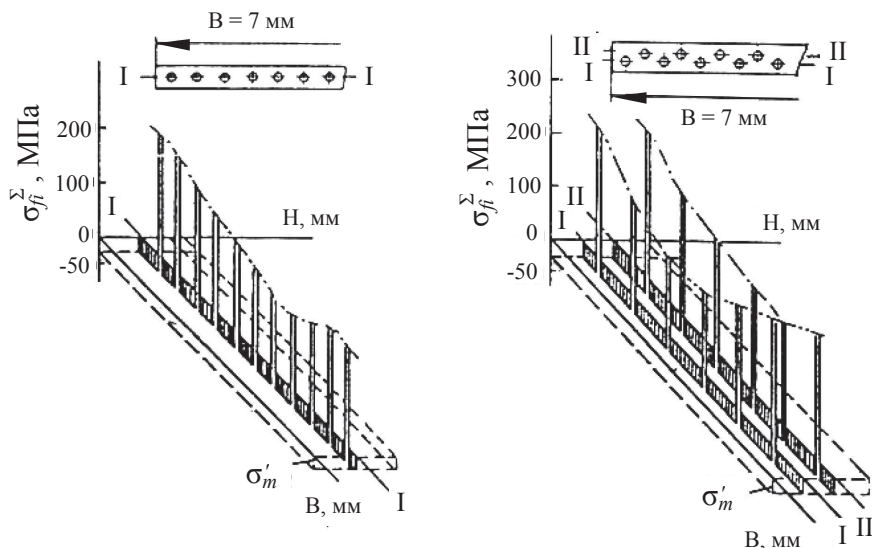


Рис. 27. Послойные поля осевых остаточных напряжений в композитах:  
 а — Al-W (13 об. %); б — Al-сталь X18 H9 T (6 об. %)

### 3.9. Метод твердости

Первые работы, посвященные выяснению зависимости между остаточными напряжениями и твердостью, появились в 1934–1936 гг., дав начало новому методу измерения остаточных напряжений [5]. Этот метод чрезвычайно прост и легко осуществим. Л. А. Гликман установил следующие закономерности изменения твердости: в упругорастянутой зоне — уменьшение на 14...17 %, в упругосжатой зоне — увеличение на 20...25 %.

Предложена методика качественного анализа остаточных напряжений по результатам двойного замера твердости: до и после разгрузки участка. Разгрузка может производиться сверлением трубчатой фре-

зой, пропиловкой надрезов и т. д. Аналогичные результаты были получены Сайнсоном и Карлсоном, установившими, что при напряжениях сжатия около 400 МПа твердость по Виккерсу повышается на 1 %, а при напряжениях растяжения того же порядка — понижается на 5 %.

Количественное определение остаточных напряжений при измерении твердости по Герцу дал Помей. Для установления связи между твердостью и напряжениями проводится опытное испытание образцов из того же материала и строится зависимость между твердостью и напряжениями, определяется коэффициент  $K$  — тангенс угла наклона касательной к кривой в каждой точке.

Зная твердость по Герцу детали с остаточными напряжениями, можно определить их величину:

$$\sigma_{\text{ост}} = K(H_1 - H_0).$$

Применение метода измерения твердости по Герцу для исследования напряженного состояния на поверхности детали может рассматриваться как решение проблем экспресс-контроля качества металлоизделий непосредственно в технологическом потоке.

Методы замера твердости, несмотря на сложности количественной оценки, находят применение для анализа остаточных напряжений в упрочненных поверхностных слоях деталей и в покрытиях. Так, согласно материалам патентной заявки [64] определение тангенциальных остаточных напряжений в полых цилиндрических деталях и трубах осуществляют следующим образом. Первоначально замеряют твердость НВ в детали без остаточных напряжений, затем в реальной детали. Полое изделие подвергается нагружению внутренним гидростатическим давлением до получения твердости, соответствующей твердости в детали без остаточных напряжений. Затем замеряют внутреннее давление и по нему судят о приложенных и остаточных напряжениях. На практике предложенный способ трудно реализуем из-за необходимости изготовления эталонного образца с тем же уровнем механических свойств, что и у испытываемой детали.

В патенте [65] предлагается способ определения остаточных напряжений в покрытиях методом замера твердости, сущность которого состоит в следующем.

Вдавливают пирамидальный индентор в поперечное сечение покрытия или слой материала до получения отпечатка твердости при



ориентации его диагоналей ортогонально направлению действия остаточных напряжений. Регистрируют усилие вдавливания, измеряют после разгрузки геометрические параметры отпечатка, с учетом которых определяют остаточные напряжения. Испытания проводят с использованием стандартного пирамидального индентора Кнупа с основанием в виде ромба. Вдавливание индентора осуществляют в двух соседних областях покрытия или слоя материала при усилии вдавливания, превышающем критическое значение. Получают два отпечатка твердости с взаимно перпендикулярной ориентацией длинных диагоналей и, с учетом проведенных измерений, определяют значения твердости по отпечаткам, в которых длинная диагональ ориентирована соответственно параллельно  $НК_1$  и перпендикулярно  $НК_2$  направлению действия остаточных напряжений. Величину остаточных напряжений  $\bar{\sigma}$  находят геометрически по разности значений твердости ( $НК_1$  и  $НК_2$ ) с использованием нормировочного графика, построенного независимым методом в координатах ( $НК_1 - НК_2$ ) —  $\bar{\sigma}$ . Приведенные в патенте [65] примеры иллюстрируют работоспособность предложенного способа замера остаточных напряжений в упрочненных поверхностных слоях и покрытиях.

Для проведения испытаний изготовили образец из стали У8 в виде параллелепипеда с размерами  $2 \times 10 \times 15$  мм. На поверхность образца методом химического газофазного осаждения нанесли покрытие из карбида титана TiC при температуре  $1050^\circ\text{C}$  в течение 6 часов. После охлаждения образец с покрытием TiC подвергли нормализации путем нагрева под слоем карбюризатора до температуры  $820^\circ\text{C}$  с последующим охлаждением на воздухе. Из образца с покрытием изготовили поперечный шлиф по общепринятой методике. На приготовленном шлифе методом металлографического анализа на микроскопе EPIVAL при увеличении 1600 измерили толщину покрытия, которая составила 22 мкм.

Затем на микротвердометре ПМТ-3 провели предварительные испытания, которые включали статическое вдавливание стандартной алмазной пирамидой Кнупа в центральной части покрытия так, чтобы диагонали ее отпечатков были ориентированы ортогонально внешней границе покрытия, вдоль которой действуют возникшие остаточные напряжения.

В первой серии испытаний длинную диагональ отпечатков твердости ориентировали параллельно внешней границе покрытия, а во вто-

рой серии испытаний — перпендикулярно внешней границе покрытия. В каждой серии испытаний вдавливание индентора Кнупа осуществляли при ступенчатом возрастании усилия  $P$ , Н, ( $0,2 < 0,4 < 0,6 < 0,8 < 1,0$ ) при переходе от точки к точке. При каждом усилии вдавливания наносили не менее 10 отпечатков твердости. После испытаний измеряли линейный размер длинной диагонали отпечатков в каждой серии с использованием металлографического микроскопа при увеличении  $1600\times$ . По результатам измерений определяли в каждой серии среднее значение микротвердости при ступенчатом возрастании усилия вдавливания  $P$  из соотношения

$$HK = \frac{P}{S} = A \frac{P}{d^2},$$

где  $S$  — площадь проекции отпечатка;  $P$  — усилие вдавливания, Н;  $d$  — размер длинной диагонали, м.

Для каждого усилия вдавливания значения твердости усредняли по результатам измерений 10 отпечатков. После этого построили графики зависимости средних значений твердости  $HK_1$   $HK_2$  от усилия вдавливания для каждой серии испытаний и определили значения критических нагрузок  $P_{C1}$  и  $P_{C2}$  при ориентации длинной диагонали отпечатков соответственно в направлениях параллельном и перпендикулярном внешней границе покрытия, которые составили  $P_{C1} = 0,6$  Н,  $P_{C2} = 0,4$  Н.

Затем в двух соседних точках покрытия провели вдавливание индентора Кнупа при усилиях, превышающих значения критических нагрузок  $P_{C1} = 0,6$  Н и  $P_{C2} = 0,4$  Н, соответствующих ориентации длинной диагонали отпечатка параллельно и перпендикулярно внешней границе покрытия. После разгрузки измеряли размеры длинных диагоналей отпечатков, с учетом которых определили значения твердости  $HK_1$  (при направлении длинной диагонали отпечатка параллельно действию остаточных напряжений) и  $HK_2$  (при направлении длинной диагонали отпечатка перпендикулярно действию остаточных напряжений).

Далее определили разность значений твердости  $HK_1 - HK_2$  и с использованием нормативного графика в координатах ( $HK_1 - HK_2$ ) —  $\bar{\sigma}$ , построенного по стреле прогиба при электролитическом травлении образца с покрытием TiC в координатах ( $HK_1 - HK_2$ ) —  $\bar{\sigma}$ , опреде-

лили величину остаточных напряжений  $\bar{\sigma} = -207$  МПа на расстоянии от поверхности 12 мкм.

В другом примере для испытаний изготовили образец из стали Г13 в виде шайбы с плоскопараллельными противоположными поверхностями, которая имела диаметр 20 мм и толщину 2 мм. На изготовленный образец по стандартным технологическим режимам, используемым при прямом электронно-лучевом испарении, было нанесено покрытие из стали X18 H10 T при температуре подложки 300 °С. Затем из образца с покрытием изготовили поперечный шлиф по общепринятой методике и измерили толщину покрытия так, как было описано в предыдущем примере. Поперечный шлиф покрытия был подвергнут испытаниям с проведением последующих измерений и графических построений по результатам предварительных испытаний для определения значений критических нагрузок  $P_{C1}$  и  $P_{C2}$  так, как это было описано в предыдущем примере. В каждой серии предварительных испытаний вдавливание индентора Кнупа осуществляли при ступенчатом возрастании усилия  $P$ , Н ( $0,2 < 0,4 < 0,6 < 0,8 < 1,0 < 1,2 < 1,5$ ) при переходе от точки к точке.

Замерены расстояние от поверхности ( $Y$ ) и усилия вдавливания, которые превышали в испытаниях критические значения  $P_{C1}$  и  $P_{C2}$  при ориентации длинной диагонали отпечатка твердости соответственно параллельно и перпендикулярно внешней границе покрытия. Величину остаточных напряжений  $\bar{\sigma}$  находили графически по разности значений твердости  $HK_1$  и  $HK_2$ , определенных в двух соседних точках покрытия при усилиях, превышающих значения критических нагрузок  $P_{C1}$  и  $P_{C2}$  так, как это было описано в первом примере. Для нахождения остаточных напряжений  $\bar{\sigma}$  использовали нормировочный график в координатах ( $HK_1 - HK_2$ ) —  $\bar{\sigma}$ , построенный при испытаниях стали X18 H10 T на твердость в условиях одноосевого сжатия, при котором индентор Кнупа ориентировали длинной диагональю отпечатка параллельно и перпендикулярно направлению оси нагружения.

Для определения распределения остаточных напряжений по сечению покрытия статическое вдавливание проводили в двух соседних точках на различном расстоянии от поверхности. При испытаниях на каждом уровне для каждой ориентации длинной диагонали отпечатка относительно внешней границы покрытия наносили по 10 отпечатков индентора. Результаты испытаний: при  $Y = 50$  мкм  $\bar{\sigma} = -270$  МПа; при  $Y = 100$  мкм  $\bar{\sigma} = -135$  МПа; при  $Y = 150$  мкм  $\bar{\sigma} = -65$  МПа.

### 3.10. Магнитные методы

Методы магнитный и электросопротивления, основанные на изменении магнитных и электролитических свойств материала при наличии остаточных напряжений, дают возможность качественного, а в отдельных случаях и количественного определения остаточных напряжений на поверхности детали. Однако эти методы недостаточно разработаны, и лишь в некоторых работах только иллюстрируется возможность их применения. В качестве примера можно привести материалы патента [66] на способ определения остаточных напряжений в ферромагнитных материалах на железной основе.

Образец из отожженной стали 45 был пластически деформирован растяжением до величины относительной деформации  $\varepsilon = 14,36\%$ . Приложенные напряжения растяжения были равны пределу прочности  $\sigma_b = 433$  МПа. Величина возникших после разгрузки остаточных напряжений неизвестна и ее предстояло определить. После разгрузки образец был повторно подвергнут растяжению с одновременным измерением величины коэрцитивной силы. Снимается диаграмма повторного растяжения  $\sigma$ – $\varepsilon$  и строится соответствующий ей график изменения  $H_{CH-\varepsilon}$ . Из графиков определено, что возникшие при холодной пластической деформации растяжением остаточные сжимающие и растягивающие напряжения равны:  $/ + \sigma / = / - \sigma / = 350$  МПа. Рентгеноструктурный анализ, принятый в качестве арбитражного способа, показал, что искажения кристаллической решетки железа (основы стали) —  $\frac{\Delta a}{a}$  ( $a = 2,861 \text{ \AA}$  — период решетки железа), вызванные остаточными напряжениями, равны  $\frac{\Delta a}{a} \pm 0,00175$ . Тогда, используя зависимость  $\sigma \frac{\Delta a}{a} E$ , находим, что  $\sigma = 0,00175 \times 2,1 \times 10^5 = \pm 368$  МПа, где  $E = 2,1 \times 10^5$  — модуль нормальной упругости, МПа. Как видно, рентгеноструктурный метод показал, что в стали возникли остаточные напряжения, равные  $\pm 368$  МПа, т. е. примерно на 5 % больше, чем по способу, заявляемому в качестве изобретения.

Таким образом, предлагаемый способ позволяет определять остаточные напряжения II рода в сталях после холодной пластической деформации. Для того чтобы проверить соблюдение режима отжига в производстве деталей из конструкционных сталей, детали не обя-

зательно подвергать растяжению до значительных деформаций. Для этого достаточно нагрузить деталь до напряжения 30...50 МПа и, измерив коэрцитивную силу, сравнить ее с исходной величиной (величина до нагружения). Если коэрцитивная сила после нагружения уменьшилась, значит остаточные напряжения полностью не сняты и отжиг был проведен некачественно, его нужно повторить. Если же после нагружения коэрцитивная сила увеличилась, это значит, что остаточные напряжения отсутствуют и отжиг проведен качественно.

Предлагаемый в работе [67] способ контроля остаточных напряжений в немагнитных металлических изделиях реализуется следующим образом. Предварительно, в соответствии с известными соотношениями электродинамики, выбирают низшую частоту  $f_n$ , обеспечивающую проникновение вихревых токов на глубину, в 2–3 раза превышающую  $\delta_n$  поверхностно обработанного слоя, и высшую частоту  $f_b$ , обеспечивающую проникновение вихревых токов на глубину, не превышающую  $\delta_n$ . Затем размещают вихретоковый преобразователь на образцовом необработанном изделии и на выходе индикаторного прибора регистрируют опорное напряжение  $U_0$ . Одновременно регулируют чувствительность измерителя разности фаз, добиваясь на выходе индикаторного прибора напряжения  $U_0$ , соответствующего реакции вихревых токов частоты  $f_b$ . Таким образом, устанавливается одинаковая чувствительность измерения сигналов высшей и низшей частот, соответствующая условию  $U_n/U_b = 1$ , где  $U_n$  и  $U_b$  — сигналы высшей и низшей частот соответственно. Величину  $U_0$  устанавливают в источнике опорного сигнала.

После этого выполняют операции, связанные с измерением на контролируемом объекте. Устанавливают вихретоковый преобразователь на поверхности контролируемого объекта, измеряют на частотах  $f_n$  и  $f_b$  сигналы  $U_n$  и  $U_b$  соответственно с помощью измерителей разности фаз и индикаторного прибора. С помощью источника опорного сигнала формируют сигналы  $U_n$  и  $U_b$ . По совокупности измеренных сигналов судят об остаточных напряжениях, возникающих в поверхностно-обработанных слоях. Характер остаточных напряжений определяют по отношению  $U_n/U_b$ : при  $U_n/U_b > 1$  остаточные напряжения сжимающие, при  $U_n/U_b < 1$  — растягивающие. Величину напряжений, усредненных в контролируемом слое, определяют по отношению

$$\frac{U_0 - U_n}{U_b} \sigma_s.$$

## 4. Теоретическое описание распределения остаточных напряжений в объеме металлоизделий

---

### 4.1. Теорема о разгрузке

---

**Т**еоретический анализ распределения и уровней остаточных напряжений в металлоизделиях в меньшей степени направлен на количественную оценку величины напряжений, но в большей — на оптимизацию технологий с целью либо максимального их снижения, либо более благоприятного по условиям эксплуатации распределения в объеме. Теоретическое определение остаточных напряжений, вообще говоря, требует решения связанной задачи термоупругопластичности [58]. Технологические проблемы снижения уровня этих напряжений приводят к необходимости постановки и решения оптимизационных задач механики деформируемого твердого тела. Число таких задач, решенных применительно к процессам механической, термической и пластической обработки материалов, весьма невелико. Это, скорее всего, определяется сложностью построения соответствующих целевых функций, описывающих остаточные напряжения через текущие параметры процесса. Всегда можно надеяться, что использование принудительного регулируемого охлаждения и других способов управления технологическим процессом позволит существенно снизить уровень или благоприятно перераспределить внутренние напряжения в металлоизделиях после завершения всех видов обработки. Стоит учитывать, что при построении целевой функции представление уровней остаточных напряжений целесообразно через текущие, а не конечные параметры процесса, поскольку в последнем случае многократное решение связанной задачи термоупругопластичности, необходимое для нахождения оптимального ре-

жима обработки металла, требует большой загрузки вычислительных средств и удорожания вычислительной процедуры.

В большинстве постановок задач теоретического анализа остаточных напряжений за основу берется доказанная А. А. Илюшиным в работах [59, 60] теорема о напряжениях, деформациях и перемещениях, возникающих при упругой разгрузке в изотермических условиях.

Теорема о разгрузке в формулировке В. Л. Колмогорова [57] представляется следующим образом: чтобы вычислить остаточные напряжения в пластически деформированном теле после снятия нагрузки, надо к напряжениям, которые имелись в теле при пластической деформации перед разгрузкой, прибавить в алгебраическом смысле напряжения, которые были бы в теле под действием внешней нагрузки противоположного знака, но в предположении совершенно упругих свойств тела.

Из доказательства видно, что теорема применима лишь для геометрически линейных задач. Применение теоремы усложняется, если упругая разгрузка происходит не во всем объеме тела, а в некоторых его зонах, тогда как в других зонах происходит пластическое активное нагружение. В этом случае необходимые для решения силовые граничные условия на границах зон и расположение самих зон можно найти из непрерывности полей перемещений, деформаций и напряжений.

Теорема о разгрузке была обобщена В. В. Москвитиным [58, 61] с учетом того, что при разгрузке могут вновь произойти пластические деформации (вторичные пластические деформации). В работе [58] рассмотрена предложенная А. Ю. Ишлинским теория пластичности линейно-упрочняющего тела при идеальном эффекте Баушингера. В работе [61] использован принцип Мазинга, согласно которому при повторном нагружении предел упругости удваивается. Теорема доказана в предположении справедливости теории малых упругопластических деформаций.

Формулировка теоремы близка к рассмотренной выше с той лишь разницей, что напряжения  $\sigma_{ij}^{(e)}$ , деформации  $\varepsilon_{ij}^{(e)}$ , перемещения  $u_i^{(e)}$  ищутся для фиктивного упругопластического тела, обладающего удвоенным пределом упругости по сравнению с величиной предела упругости рассматриваемого тела. Индекс (е) указывает на упругое состояние тела. Поверхность, отделяющая области вторичных пластических деформаций и упругой разгрузки, совпадает с поверхностью, которая отделяет области упругих и пластических деформаций в фиктивном теле.



Теоремы о разгрузке в условиях неравномерного нагрева при зависимости механических характеристик материала от температуры были рассмотрены Ю. Н. Шевченко [62]. Сначала обобщена теорема об упругой разгрузке, когда материал тела не выходит вторично за предел упругости. В этом случае вводятся приведенные компоненты тензора напряжений в начале разгрузки к распределению температур в теле, при котором определяется напряженное состояние:

$$\sigma_{ij}^0 = \frac{G(T_1)}{G(T)} \sigma_{ij} - \sigma_{ij}^*; \quad \varepsilon_{ij}^0 = \varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ij}^*; \quad u_i^0 = u_i - u_i^*,$$

где — (\*) символ транспонирования;  $G$  — модуль сдвига;  $T$  — температура начала разгрузки;  $T_1$  — температура конца разгрузки.

Предполагается, что коэффициент Пуассона  $\mu$  не зависит от температуры. Вводятся также модифицированные объемные и поверхностные силы. После этого формулировка теоремы о разгрузке не отличается от формулировки теоремы А. А. Илюшина. Затем рассмотрен случай появления в некоторой области тела вторичных пластических деформаций. Используется теория малых упругопластических деформаций. Отличие от теоремы В. В. Москвитина заключается во введении приведенных напряжений, модифицированных объемных и поверхностных сил, а также приведенной интенсивности напряжений. Дальнейшее исследование теоремы об упругой разгрузке при зависимости механических характеристик материала от температуры описано в работе [63].

Применение указанных теорем о разгрузке к прикладным задачам вызывает ряд трудностей: 1) разгрузка начинается неодновременно в разных участках тела; 2) траектории нагружения в этих задачах лучше описываются различными вариантами теории пластического течения, чем теорией малых упругопластических деформаций, для которой доказаны теоремы о разгрузке, в случае появления вторичных пластических деформаций; 3) необходимость решения задачи термоупругопластичности для знания напряженного деформированного состояния в момент начала разгрузки; 4) для использования теорем нужно еще найти решение при разгрузке, что в случае вторичных пластических деформаций связано с решением краевой задачи.



Тем не менее, многие задачи расчета остаточных напряжений в заготовках после обработки давлением удастся решить достаточно простым способом, используя классическую теорему о разгрузке. В частности, в работе [57] приводится решение задачи безоправочного волочения толстостенной трубы с определением распределения остаточных напряжений по толщине стенки.

В отличие от других операций деформации труб, безоправочному волочению свойственно существенное различие в напряженном состоянии внутри и снаружи: если по наружной поверхности со стороны волоки действуют сжимающие нормальные напряжения, то внутри такой поверхности нет.

Предполагается, что материал трубы идеально пластичный и несжимаемый, она деформируется без удлинения, течение изотермическое и достаточно медленное. Все эти допущения лишь в некоторой степени правдоподобны, но существенно упрощают последующий анализ.

Определим напряженное состояние и поле скоростей в сечении трубы в некоторый момент времени (см. рис. 28). Пусть имеет место осесимметричное плоское течение во всем объеме и на поверхности  $v_\phi = 0$ ;  $v_z = 0$  и  $\sigma_{r\phi} = 0$ . Для решения задачи достаточно иметь следующие граничные условия: при  $r = r_n$   $v_r = -v$ , при  $r = r_v$   $f_r = 0$ . Внешняя поверхность типа  $S_v$ , внутренняя —  $S_f$ . Полная система дифференциальных уравнений вырождается в систему (41)

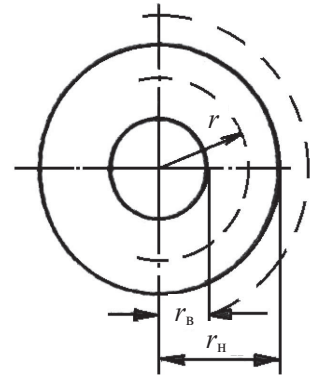


Рис. 28. Расчетная схема трубы

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\phi\phi}}{r} &= 0; \quad \sigma_{rr} - \sigma_{\phi\phi} = 1,15 \sigma_s; \\ \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (41)$$

в которой первое уравнение — уравнение равновесия, второе — условие идеальной пластичности (предел текучести  $\sigma_s$  задан), третье уравнение — условие несжимаемости. Система (41) включает одномерные, зависящие только от  $r$ , искомые функции  $\sigma_{rr}$ ,  $\sigma_{\phi\phi}$  и  $v_r$ , поэтому дифференциальные уравнения обыкновенные.

После интегрирования первого уравнения, используя условие пластичности, можно записать:

$$\frac{d\sigma_{rr}}{dr} + 1,15 \frac{\sigma_s}{r} = 0 ;$$

$$\sigma_{rr} = -1,15 \sigma_s \ln r + c_1 .$$

Известно, что при  $r = r_B$   $f_r = \sigma_{rr} n_r + \sigma_{r\varphi} n_\varphi + \sigma_{rz} n_z = 0$ , а так как  $n_r = -1$ ,  $n_\varphi = n_z = 0$ , то  $\sigma_{rr} = 0$ . Тогда окончательно получим

$$\sigma_{rr} = -1,15 \sigma_s \ln(r/r_B), \quad (42)$$

и из условия пластичности

$$\sigma_{\varphi\varphi} = -1,15 \sigma_s [1 + \ln(r/r_B)]. \quad (43)$$

Давление или напряжение осадки трубы  $f_r = \sigma_{rr} \big|_{r=r_H}$  (на внешней поверхности  $n_k = 1$ )

$$f_r = -1,15 \sigma_s \ln(r_H/r_B). \quad (44)$$

После пластической деформации в изделии возникают остаточные напряжения. Как уже отмечалось, теорема о разгрузке предполагает, что при разгрузке не возникают вторичные деформации, и она осуществляется только упруго.

В трубе в последний момент ее пластической деформации действовали напряжения (42) и (43), внешняя нагрузка (давление) соответствовала формуле (44).

Следуя теореме о разгрузке, вычисляется поле напряжений в трубе, находящейся под воздействием внешней нагрузки обратного, чем в формуле (44), знака

$$f_r = 1,15 \sigma_s \ln(r_H/r_B), \quad (45)$$

но уже в предложении, что материал трубы находится в упругом состоянии. Система уравнений для упругого материала, находящегося в условиях плоского деформированного состояния, имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}}{r} &= 0; \\ \sigma_{rr} - \sigma &= 2G \left( \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{\varepsilon}{3} \right); \\ \sigma_{\varphi\varphi} - \sigma &= 2G \left( \frac{u_r}{r} - \frac{\varepsilon}{3} \right); \\ \sigma_{zz} - \sigma &= 2G \left( -\frac{\varepsilon}{3} \right); \\ \varepsilon &= 3k\sigma, \end{aligned} \right\} \quad (46)$$

где  $u_r$  — упругое перемещение при разгрузке;  $\varepsilon = \varepsilon_{rr} + \varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{zz}$  — относительное изменение объема;  $\varepsilon_{rr} = \partial u_r / \partial r$ ;  $\varepsilon_{\varphi\varphi} = u_r / r$ ;  $\sigma = (\sigma_{rr} + \sigma_{\varphi\varphi} + \sigma_{zz}) / 3$ . Система должна быть проинтегрирована с учетом граничных условий:  $f_r = \sigma_{rr} = 1,15\sigma_s \ln(r_n / r_b)$  при  $r = r_n$  и  $f_r = -\sigma_{rr} = 0$  при  $r = r_b$ . Механические переменные зависят от  $r$ .

Если подставить во второе и третье уравнения системы (46) значение  $2G(-\varepsilon/3)$  из четвертого уравнения, то они приобретут вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u_r}{\partial r} &= \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{zz}}{2G}; \\ \frac{u_r}{r} &= \frac{\sigma_{\varphi\varphi} - \sigma_{zz}}{2G}. \end{aligned} \right\} \quad (47)$$

Исключим из системы (47) переменную  $u_r$ . Для этого продифференцируем последнюю формулу в выражении (47) по  $r$ , разрешив предварительно его относительно  $u_r$ , и вычтем полученный результат из первого уравнения. Получим

$$\sigma_{rr} = \sigma_{\varphi\varphi} + r \left( \frac{\partial \sigma_{\varphi\varphi}}{\partial r} - \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial r} \right). \quad (48)$$

Объединим последние два уравнения в системе (46), подставив  $\varepsilon$  в четвертое уравнение,  $\sigma(1 - 2Gk) = \sigma_{zz}$ . Если теперь учесть, что  $\sigma = (\sigma_{rr} + \sigma_{\varphi\varphi} + \sigma_{zz})/3$ , то из последнего уравнения получим уравнение (49)

$$\sigma_{zz} = \nu(\sigma_{rr} + \sigma_{\varphi\varphi}). \quad (49)$$

Подставив уравнение (48) и (43), можно получить

$$\frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}}{r} = \frac{\partial}{\partial r} \left[ \sigma_{\varphi\varphi} - \nu(\sigma_{rr} + \sigma_{\varphi\varphi}) \right]. \quad (50)$$

Преобразованиями систему (46) удалось свести к двум уравнениям — уравнению (50) и первому уравнению в системе (46). Их совместное решение можно осуществить, подставив уравнение (50) в дифференциальное уравнение равновесия  $(1 - \nu)\partial/\partial r(\sigma_{rr} + \sigma_{\varphi\varphi}) = 0$ .

Тогда

$$\sigma_{rr} + \sigma_{\varphi\varphi} = 2A = \text{const}. \quad (51)$$

Учтем последний результат в дифференциальном уравнении равновесия  $r\partial\sigma_{rr}/\partial r + 2\sigma_{rr} = 2A$ , которое после этого легко интегрируется и имеет вид

$$\begin{aligned} \partial/\partial r(r^2\sigma_{rr}) &= 2Ar, \\ \sigma_{rr} &= A + B/r^2. \end{aligned} \quad (52)$$

Частное решение можно выделить из общих интегралов (51) и (52) системы уравнений с помощью граничных условий: при  $r = r_H$   $\sigma_{rr} = 1,15\sigma_s \ln(r_H/r_B)$ , при  $r = r_B$   $\sigma_{rr} = 0$ . Тогда напряжения в упругодеформируемой трубе, находящейся под воздействием внешнего напряжения  $f_r$  (см. уравнение (45)), примут вид

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{rr} &= f_r r_H^2 \frac{1 - r_B^2/r^2}{r_H^2 - r_B^2}; \\ \sigma_{\varphi\varphi} &= f_r r_H^2 \frac{1 + r_B^2/r^2}{r_H^2 - r_B^2}; \\ \sigma_{zz} &= \nu f_r r_H^2 (r_H^2 - r_B^2). \end{aligned} \right\} \quad (53)$$

## 4.2. Метод решения связанных задач термоупругопластичности

Согласно теореме о разгрузке остаточные напряжения будут равны алгебраической сумме напряжений пластической деформации (42), (43) и напряжений упругой нагрузки (53). Таким образом, на внутренней поверхности труб имеют место значительные растягивающие остаточные напряжения  $\sigma_{\text{фф}}$ , которые способствуют развитию трещин. Анализ в рамках данной методики показывает, что безоправочное волочение, как одно из завершающих операций производства толстостенных труб для топливопроводов, обладает существенными недостатками, предопределяющими получение дефектов на внутренней поверхности. Это обстоятельство послужило основанием применения оправочного волочения труб вместо безоправочного.

В работе [58] рассматривается проблема теоретического определения распределения в объеме тела остаточных напряжений с позиций механики деформируемого твердого тела. Данная работа посвящена разработке подхода к определению оптимальных режимов обработки металлов с целью снижения уровня термических и деформационных остаточных напряжений.

Соответствующая задача может быть сформулирована следующим образом. В начальный момент времени ( $\tau_0$ ) металл исследуемой области находится в ненапряженном и недеформируемом состоянии в некотором неоднородном температурном поле  $T_0 = (x)$ . При остывании тела до температуры  $T_1$  на рассматриваемую область действуют различные силовые и тепловые нагрузки. Некоторые из них можно рассматривать как управляющие воздействия. Поиск оптимального управления минимизирует уровни остаточных напряжений в конце процесса.

В такой постановке можно рассматривать остаточные напряжения самой различной природы: термические, деформационные за счет неоднородности пластических деформаций, напряжения, вызванные фазовыми превращениями.

Авторы работы [58] считают, что наиболее удобным методом для определения остаточных напряжений является решение связанной задачи термоупругопластичности в течение всего периода охлаждения тела от начальной температуры  $T_0$  до температуры среды  $T_1$ . На-

пряжения, получающиеся при полном остывании и силовой нагрузке, и будут остаточными напряжениями. Связанная задача термоупруго-пластичности позволяет определить напряжения, деформации, перемещения, температуру тела в процессе остывания и остаточные напряжения перемещения, деформации в конце процесса.

В систему уравнений включаются:

- уравнение нестационарной теплопроводности;
- уравнение равновесия (для квазистатических процессов);
- определяющие уравнения в приращениях, конкретный вид которых зависит от принятой теории термоупругопластичности;
- геометрические уравнения;
- начальные и граничные условия весьма разнообразные и зависящие от характера решаемой задачи.

В некоторых случаях в граничные условия вместо температуры окружающей среды входит температура поверхности другого тела, контактирующего с рассматриваемым. В этом случае приходится решать температурную задачу для системы двух тел. При необходимости учета термоупругих деформаций инструмента, деформирующего рассматриваемое тело, в систему уравнений входят также уравнения термоупругости для инструмента.

Решение поставленной краевой задачи ведется методом последовательных нагружений в пределах малых промежутков времени. Для прикладных задач, когда во многих случаях форма области является достаточно сложной, эффективно используется метод конечных элементов.

Температурный режим играет определяющую роль практически во всех процессах ОМД. Известно, что для исследования интегральных характеристик процессов достаточно, как правило, знать средние значения температуры во всей исследуемой области или в ее частях. Для определения и управления уровнем остаточных напряжений необходимо знать не только среднюю температуру, но и ее распределение во всем объеме или сечении изучаемого тела.

С математической точки зрения соответствующая краевая задача является весьма сложной, поскольку приходится иметь дело с нестационарным процессом в области сложной геометрии, изменяющей при деформации свою конфигурацию [58]. При расчете температурных полей необходимо учитывать лучеиспускание и взаимоизлучение элементов, естественную и вынужденную конвекцию, выделение теп-

ла от деформации и внешнего трения, принудительное охлаждение, теплообмен с деформирующим инструментом, наличие фазовых превращений, зависимость теплофизических параметров от температуры.

Исходная краевая задача теплопроводности с непрерывно изменяющейся при деформации областью сводится к решению последовательности задач со ступенчатым изменением конфигурации, причем задачи последовательно во времени связаны друг с другом через начальные условия.

В работе [58] выполнена постановка и решение задачи термоупругопластичности, с целью определения распределения оптимизации уровня остаточных напряжений, в процессах горячей прокатки сплошных фасонных профилей и волочения стальной высокоуглеродистой проволоки.

Из доказательства теоремы о разгрузке, приведенного в работе [58], следует, что она применима лишь для геометрически линейных задач. Применение теоремы усложняется, если упругая разгрузка происходит не во всем объеме тела, а в некоторых его зонах, тогда как в других зонах происходит пластическое активное нагружение. В этом случае необходимые для решения силовые граничные условия на границах зон и расположение самих зон можно найти из непрерывности полей перемещений, деформаций и напряжений.

В работе [74] выполнен расчет остаточных напряжений после упругопластической деформации вариационным методом. Остаточные напряжения заданы в виде отрезка степенного ряда с варьируемыми параметрами (метод Ритца). Конкретизация решения достигнута при описании напряженного состояния листа при изгибе и кручении круглого прутка. Отмечено, что вариационное решение применимо при известном поле пластических деформаций, при этом теорема о разгрузке не применяется. Предложен вариационный принцип расчета остаточных напряжений, эквивалентный теореме о разгрузке и справедливый для случаев, когда разгрузка сопровождается только упругими деформациями. Согласно этому принципу абсолютный минимум функционала

$$I = \frac{1}{2} \int_{(V)} A_{ijk} \sigma_{ij}^{\text{ост}} \sigma_{hk}^{\text{ост}} dV + \int_{(V)} \sigma_{ij}^{\text{ост}} \varepsilon_{ij}^{\text{пл}} dV, \quad (54)$$

определенного для заданных пластических деформаций  $\varepsilon_{ij}^{\text{пл}}$  и для всех статически возможных распределений остаточных напряжений  $\sigma_{ij}^{\text{ост}}$ ,

отвечает действительному распределению остаточных напряжений. Здесь  $V$  — объем деформируемого тела;  $A_{ijhk}$  — матрица коэффициентов, характеризующих упругие свойства материала.

Функционал (54) вариационного принципа для случая упругопластического изгиба имеет вид

$$I = \frac{1}{2E} \int_{(V)} (\sigma_{vv}^{\text{ост}})^2 dV + \int_{(V)} \sigma_{vv}^{\text{ост}} \varepsilon_{vv}^{\text{пл}} dV, \quad (55)$$

где  $v$  — тангенциальная координата при изгибе.

Для минимизации последнего выражения используем метод Ритца, в соответствии с которым искомое напряжение представляется в виде отрезка степенного ряда

$$\sigma_{vv}^{\text{ост}} = \sigma_{0,2} \sum_{i=1}^n a_i \left( \frac{w}{S} \right)^{2i-1}, \quad (56)$$

где  $w$  — радиальная координата при изгибе;  $a_i$  — варьируемые параметры.

На ряд (56) накладывается ограничение

$$\int_{-S/2}^{S/2} \sigma_{vv}^{\text{ост}} w dw = 0, \quad (57)$$

отражающее взаимоуравновешенность остаточных напряжений. Дифференцирование выражения (55) по варьируемым параметрам  $a_i$  с учетом (56), (57) позволяет свести вариационную задачу к решению системы  $n-1$  алгебраических линейных уравнений вида

$$\sum_{i=1}^{n-1} \alpha_{ji} a_i = \beta_j, \quad j = 1, 2, 3, \dots, n-1,$$

где  $\alpha_{ji}$ ,  $\beta_j$  — некоторые коэффициенты. Система уравнений имеет единственное решение, сообщающее минимум функционалу. Ре-



зультаты расчета по вариационному принципу и по теореме о разгрузке близки друг другу и имеют характер, совпадающий с приведенным в работе [77].

По мере увеличения порядка  $n$  ряда Ритца результаты расчета по вариационному принципу приближаются к экспериментально найденному распределению остаточных напряжений. Расчет по вариационному принципу дает в данном случае лучшие результаты, чем теорема о разгрузке.

Приведенные результаты подтверждают возможность применения вариационного принципа для определения остаточных напряжений в тех случаях, когда из каких-либо соображений известно поле пластических деформаций, а использование теоремы о разгрузке затруднительно.

Вариационный метод для расчета конечного формоизменения и остаточных напряжений использован при анализе процесса навивки трубы на барабан [78].

В условиях бухтового волочения при навивке трубы на барабан происходит дополнительная деформация, при которой возникает искажение формы поперечного сечения изделия. Величина овализации должна ограничиваться как с технологической точки зрения, так и по условиям нормативных документов на готовую продукцию. Если труба поставляется в нагартованном состоянии, то условия ее эксплуатации также зависят и от уровня остаточных напряжений. В работе [78] рассматривается контур деформированной при навивке трубы в виде овала с параметрами  $a$  и  $b$ , удовлетворяющими условию недеформируемости срединной линии поперечного сечения трубы:  $2r_{cp} = a + b$ , где  $r_{cp}$  — радиус срединной линии трубы,  $a$  и  $b$  — полуоси овала.

При постановке задачи по анализу овализации использовали свойства материала, описываемые нелинейно-упругой средой:  $T = A\Gamma^m$ , где  $T$  — интенсивность касательных напряжений,  $\Gamma$  — интенсивность деформации сдвига,  $A$  и  $m$  — коэффициенты аппроксимации механических характеристик.

Для реализации решения использовали постулат Кирхгофа–Лява, условие недеформируемости срединного контура поперечного сечения трубы от изгиба, растяжения и овализации, а также начало Лагранжа для формулирования основного функционала полной энергии, подлежащего минимизации:

$$\delta \left[ \int_S T \Gamma dS \right] = 0,$$

где  $S$  — площадь поперечного сечения трубы.

Компоненты общего тензора деформаций получены суперпозицией решений, выполненных раздельно для растяжения трубы после выхода ее из очага деформации, изгиба при навивке на барабан диаметром  $D_6$  и процесса овализации трубы.

Компоненты напряжений определяются по формулам:

- от растяжения трубы с учетом недеформируемости срединной линии поперечного сечения:

$$\varepsilon_z = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{\sigma}{3A}}, \quad \varepsilon_\rho = -\varepsilon_z, \quad \varepsilon_\varphi = 0;$$

- от изгиба трубы при навивке на барабан:

$$\varepsilon_z = \frac{\gamma}{R_6 + b + t/2}, \quad \varepsilon_\rho = -\varepsilon_z, \quad \varepsilon_\varphi = 0;$$

- от овализации трубы:

$$\varepsilon_z = 0, \quad \varepsilon_\rho = -\varepsilon_\varphi, \quad \varepsilon_\varphi = \frac{\gamma}{r_{cp} + \gamma} \left( \frac{r_{cp}}{r} - 1 \right),$$

где  $R_6 = D_6/2$  — радиус барабана,  $\gamma$  — расстояние по нормали от рассматриваемой точки до срединной линии,  $r$  — текущее значение радиуса в рассматриваемой точке,  $\sigma$  — напряжение волочения.

Алгебраическое сложение результатов решений для трех видов деформации на основании принципа малости деформаций позволяет получить компоненты тензора малой деформации  $T_\varepsilon$  и величину интенсивности сдвиговых деформаций

$$\Gamma = 2\sqrt{|\varepsilon_\rho \varepsilon_\varphi + \varepsilon_\varphi \varepsilon_z + \varepsilon_z \varepsilon_\rho|}.$$

При минимизации функционала полной энергии, в связи с меняющейся формой области, интегрирование проводится численно при варьировании значений коэффициента овализации  $\omega = \Delta r / r_{\text{ср}}$  и коэффициента напряжения волочения  $\kappa = \sigma / \sigma_s$  ( $\sigma_s$  — сопротивление деформации материала после выхода из очага деформации с учетом истории деформирования трубы в предыдущих проходах).

В качестве исходных данных приняты диаметр барабана  $D_6$ , наружный диаметр трубы  $d$  и толщина стенки  $t$ , величина вытяжки за проход, значения напряжения волочения и коэффициентов аппроксимации механических характеристик металла.

Для определения величины остаточных деформаций и напряжений использована теория малых упругопластических деформаций с описанием компонентов тензора деформации в логарифмической форме. Рассматриваются два состояния: момент навивки трубы на барабан и сброс бухты после волочения на рабочий стол. Средний диаметр бухты увеличивается с величины  $D_6 + d$  до  $D^*$ .

Так как состояние материала трубы после очага деформации при навивке на барабан является упругопластическим, то справедлива гипотеза Кирхгофа—Лява, а закон распределения деформаций по сечению трубы является линейным.

Для описания распределения напряжений в поперечном сечении используется уравнение состояния вида  $\sigma = E\epsilon$  для участка линейной упругости и  $\sigma = \sigma_{0,2} + B\bar{\epsilon}^m$  — для нелинейного участка. При этом расчет возникающих напряжений в каждой точке проводится с учетом симметрии и представляется в виде функции  $\sigma(\rho, \varphi)$  в поперечном сечении трубы.

Новое значение диаметра бухты можно определить как

$$D^* = dl \left[ \left( 1 - \frac{d}{d + D} \right)^{1/c} - 1 \right],$$

где  $c = \epsilon / \epsilon_0 > 1$  — коэффициент отношения полной деформации к остаточной.

Напряжения, распределенные по кольцевому поперечному сечению, после снятия с барабана в зонах сжатия и растяжения изогнутой с радиусом  $R^* = D^*/2$  трубы должны удовлетворять условиям равновесия:

$$\int_{S_c} \sigma(\rho, \varphi) ds = 0, \quad \int_{S_p} \sigma(\rho, \varphi) ds = 0.$$

Если в зонах растяжения и сжатия поведение металла описывается различными кривыми упрочнения, то условие равновесия должно удовлетворяться для всего сечения площадью  $S$ :

$$\int_S \sigma(\rho, \varphi) ds = 0, \quad S = S_c = S_p.$$

Это достигается только при разгибке трубы в момент сброса бухты на рабочий стол. Эпюры распределения напряжений в поперечном сечении изменяются в следующей последовательности. В момент выхода заднего конца трубы из матрицы исчезает напряжение волочения. Напряжения от изгиба, первоначально распределенные в сечении по некоторому закону, образуют внутренний результирующий момент, который производит разгибку трубы. Деформации от изгиба уменьшаются и при большем значении диаметра бухты  $D^*$ .

Интерес для практики представляют теоретические исследования, проведенные в работах [75, 76]. Опираясь на многочисленные исследования внутренних напряжений в стальных холоднотянутых пружинах, в полых цилиндрах, подвергнутых раздаче, и в калиброванных или в цилиндрических заготовках, подвергнутых дробеструйной обработке, показана возможность с помощью методов теории размерностей делать простые расчеты внутреннего напряженного состояния, возникающего при этих процессах холодной пластической деформации. Эти расчетные методы теории размерностей включают в себя в основном приемы теории моделирования и размерного анализа, основой которого является так называемая  $\pi$ -теорема. Под анализом размерностей понимают вывод уравнений из величин, характерных для данной проблемы.

При исследовании процесса волочения прутков выбираются наиболее характерные величины, задающие свойства материала и некоторые параметры процесса:  $\sigma_T$  — предел текучести;  $\sigma_s$  — сопротивление деформации;  $G$  — модуль сдвига;  $\mu$  — коэффициент Пуассона;  $r$  — текущий радиус или  $q$  — поперечное сечение;  $q_0$  — исходное сечение или  $r_0$  — радиус сечения прутка;  $\Delta r_0$  — уменьшение радиуса прутка или  $\Delta q_0$ ;  $\sigma$  — распределение внутренних осевых, тангенциальных и радиальных напряжений.

Из безразмерных соотношений указанных величин необходимо составить подходящие функции типа

$$F\left(\frac{\sigma_s}{\sigma_T}; \frac{q}{q_T}; \frac{\sigma}{\sigma_T}; \frac{\Delta q_0}{q_0}; \frac{G}{G_0}; \mu\right) = 0. \quad (58)$$

Подходящая функция, построенная по законам моделей, будет характеризовать конкретный случай волочения. Безразмерные остаточные напряжения, рассчитанные согласно подходящим функциям для конкретного процесса, представляются в виде отвлеченных чисел, и им в соответствие ставятся истинные значения остаточных напряжений, возникающих в данном случае волочения, найденные экспериментально.

После этого модель можно считать построенной и готовой к использованию для самого объекта. Закономерности, обобщенные моделью, могут быть распространены на другие процессы волочения, соответствующие критериям подобия, заложенным в модель.

Рассмотренное в качестве примера выражение (58) выступает как модель процесса волочения, в которой подобие распространено лишь на свойства протягиваемого материала и обжатия при волочении. Легко догадаться, что в случае необходимости модель может быть построена по признаку подобия других, вероятно любых, параметров.

В работе [75] приведены эмпирические формулы, полученные на основе размерного анализа, для расчета распределения продольных и тангенциальных остаточных напряжений в холоднотянутых прутках:

$$\sigma_x = \sqrt{3} \sigma_T \ln \frac{2G}{G_T} \ln \left( 1 + \frac{\Delta q_0}{q_0} \right) \left[ \frac{2}{3} \left( \frac{q}{q_0} - \frac{1}{4} \right)^2 10 - 1 \right];$$

$$\sigma_\varphi = \frac{2}{3} \sigma_T \ln \frac{2G}{G_T} \ln \left( 1 + \frac{\Delta q_0}{q_0} \right) \left[ \frac{2}{3} \left( \frac{q}{q_0} - \frac{1}{4} \right)^2 10 - 1 \right].$$

В статье [79] предложен новый подход к приближенному решению задачи о НДС методом упругих решений при операции дорнования. Вместо последовательных приближений решения с использованием фиктивного модуля упругости, учитывающих влияние пластического

деформирования, выполняется степенная аппроксимация кривой деформирования, а затем решается упругая неоднородная задача для цилиндра с модулем упругости, зависящим от радиуса. Решение позволяет учитывать при моделировании НТС начальные остаточные напряжения, имевшиеся в детали от предшествующих воздействий на нее.

Результаты решения обеспечивают прогнозирование остаточных напряжений и деформаций как при малых, так и при средних натягах дорнования.

Для анализа распределения остаточных напряжений в холодноотянутых изделиях (проволоке, прутках и трубах) вполне применимы методы расчленения тел [80].

Процесс возникновения остаточных напряжений в проволоке можно разбить на три этапа.

1. При выходе металла из очага деформации поперечные слои проволоки переходят из пластического в упругое состояние, т. е. происходит своеобразная разгрузка деформированного металла.

2. Проволока, выходящая из очага деформации, имеет неравномерное поле температур. По всему сечению пропорционально интенсивностям деформации распределено тепло пластической деформации. На поверхности проволоки имеются значительные пики температур, возникающие в результате контактного трения в очаге деформации. Теплота внешнего трения при выходе из волоки заключена в очень тонком приконтактном слое проволоки. Начинаются тепловые процессы выравнивания температуры по сечению проволоки.

3. При сползании витков готовой проволоки с приемного барабана на его коническую часть происходит полная разгрузка проволоки. После этого наблюдается лишь дальнейшее охлаждение металла, т. е. продолжается тепловая разгрузка проволоки.

Если интенсивность деформации  $\Gamma$  после выхода металла из очага деформации определяется не теоретически, а экспериментально, то можно рекомендовать для описания искажения линий координатной сетки в осевой плоскости образца функцию

$$z = \frac{A^3}{A^2 + Br^2} \quad (A \text{ и } B \text{ зависят от основных параметров волочения}), \text{ или } \bar{z} = \frac{B^3}{B^2 + Br^2}, \text{ где}$$

$\bar{z} = \frac{z}{R_1}; \bar{r} = \frac{r}{R_1}; B = \frac{A}{R_1}; R_1$  — радиус калибрующей части волоки.

Принимая закон упрочнения в виде  $\sigma_s = \sigma_{s0} + N\Gamma^M$  (где  $N$  и  $M$  — эмпирические коэффициенты), из условия постоянства секундных объемов и условия несжимаемости можно записать распределение интенсивности деформации по сечению проволоки:

$$I = 2 \sqrt{\left(1 - \frac{1}{\exp \frac{\varepsilon}{2}}\right) - \varepsilon \left(1 - \frac{1}{\exp \frac{\varepsilon}{2}}\right) + \varepsilon^2 + \frac{B^6 B^2 \bar{r}^2}{(B^2 + B\bar{r}^2)^4}}.$$

Здесь  $\varepsilon = 2 \ln \frac{R_0}{R_1}$ ,  $R_0$  — радиус исходного сечения проволоки.

Известно, что почти вся внешняя работа, затрачиваемая на волочение, превращается в тепло.

Количество тепла, отводимого проволокой в единицу времени без учета контактного трения, ккал/с,

$$Q_{\text{вн}} = 6,24 \cdot 10^{-3} \tau_{s0} R_1^2 V_b \left[ 1,734 \varepsilon \frac{M+k}{M+1} + \frac{2}{3} (k+1) \operatorname{tg} \alpha \right],$$

где  $\tau_{s0} = \sigma_{s0} / \sqrt{3}$ ;  $V_b$  — скорость волочения, м/с;  $\alpha$  — полуугол волоки;  $k$  — коэффициент упрочнения.

Количество тепла, выделяемого на контактной поверхности за счет работы сил трения, ккал/с,

$$Q_{\text{тр}} = 7,37 \cdot 10^{-3} \tau_{s0} R_1^2 V_b \psi \varepsilon \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}{\operatorname{tg} \alpha},$$

где  $\psi = \tau_k / \tau_s$  — отношение средних контактных касательных напряжений к среднему в очаге деформации значению предела текучести на сдвиг.

Количество уносимого проволокой тепла от внешнего трения, ккал/с, может быть определено из выражения [81]:

$$Q_{\text{тр}}^{\text{нр}} = 6,64 \cdot 10^{-3} \tau_{s0} R_1^2 V_b \psi \varepsilon \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}{\operatorname{tg} \alpha} \left( 1 - \frac{500 \varepsilon^2 + 5 \sqrt{120 V_b R_1}}{360 V_b R_1 + 5 \sqrt{120 V_b R_1}} \right). \quad (59)$$

Температура проволоки от работы внутренних сил в среднем по сечению повысится на

$$(\bar{t} - t_0) = \frac{3 \cdot 10^3 Q_{\text{вн}}}{\pi R_1^2 V_b \rho c (\exp \varepsilon + \exp \varepsilon / 2 + 1)},$$

где  $\bar{t}$  — средняя температура проволоки по сечению в момент выхода из очага деформации;  $t_0$  — температура окружающей среды;  $\rho$  — плотность материала проволоки, г/см<sup>3</sup>;  $c$  — удельная теплоемкость материала проволоки, ккал/(кг град).

Полагая, что температура по сечению проволоки распределяется пропорционально интенсивности деформации, находим это распределение [82]:

$$\begin{aligned} (\bar{t} - t_0) &= \\ &= \frac{3 \cdot 10^3 Q_{\text{вн}} \Gamma}{\pi V_b \rho c (\exp \varepsilon + \exp \varepsilon / 2 + 1) A^* \sqrt{\left(1 - \frac{1}{\exp \varepsilon / 2}\right)^2 - \varepsilon \left(1 - \frac{1}{\exp \varepsilon / 2}\right) + \varepsilon^2}}, \quad (60) \end{aligned}$$

$$\text{где } A^* = 1 + \frac{B^2 \left( \frac{B^2}{B} + \frac{1}{3} \right)}{\left[ \left(1 - \frac{1}{\exp \varepsilon / 2}\right)^2 - \varepsilon \left(1 - \frac{1}{\exp \varepsilon / 2}\right) + \varepsilon^2 \right] 4 \left( \frac{B^2}{B} + 1 \right)^3}.$$

Таким образом, исходя из уравнения (60), можно найти температуру по сечению проволоки, учитывая при этом дополнительный разогрев поверхности проволоки от контактного трения, который может быть рассчитан по формуле (59) с учетом времени контакта и теплопроводности материала проволоки.



Теперь, например, с помощью метода расчленения тел [81] можно определить эпюру продольных остаточных напряжений в проволоке после волочения. Сущность этого метода заключается в рассмотрении исследуемого тела как статически неопределимой стержневой системы.

Представим проволоку, выходящую из волоки, в виде длинного цилиндра, составленного из  $n$  свободно, но без зазора вставленных друг в друга трубок. Трубки сварены между собой только по торцам. Толщина всех трубок одинакова и равна  $R_1/n$ . Площадь поперечного сечения любой трубки (слоя)

$$F_i = \pi \frac{R_1^2}{n^2} (2_i - 1).$$

Для построения эпюры по сечению проволоки можно считать достаточным число слоев  $n = 5$  (первый слой лежит в центре сечения проволоки).

Модуль упругости  $E$ , предел текучести  $\sigma_s$  и коэффициент температурного расширения  $\beta$  являются функциями температуры, которые достаточно точно можно аппроксимировать выражениями

$$E_t = E_{20^0C} - \alpha_1 t^\gamma; \quad \beta_t = \beta_{20^0C} + \alpha_3 t^{\gamma_3}; \quad \sigma_{st} = \sigma_{s0} \left| \Lambda \Gamma^M \right| \alpha_2 t^{\gamma_2} \exp \delta t. \quad (61)$$

Прежде всего следует определить относительную деформацию проволоки  $e'$  с температурной и деформационной неоднородностью по сечению и с учетом (61), считая, что осуществлено осевое нагружение проволоки до усилия, равного силе волочения  $P_b$ :

$$e' = \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i E_i F_i t_i + P_b}{\sum_{i=1}^n E_i F_i}, \quad (62)$$

где  $t_i$  — разность между температурой соответствующего слоя и окружающей средой.

Упругие продольные напряжения, возникающие в слоях,  $\sigma_i^{n1} = (-\beta_i t_i + e') E$ . Если все напряжения  $\sigma_i^{n1}$  ниже пределов текуче-

сти, рассчитанных по формуле (61), то можно ограничиться упругим расчетом. Когда же напряжение в каком-либо слое превзойдет предел текучести материала, то в выражении (62) слагаемое  $\beta_i E_i F_i t_i$ , соответствующее данному слою, следует заменить на  $\sigma_{sti} F_i$  с обратным знаком. Тогда выражение для относительной деформации проволоки может быть представлено в виде

$$e = \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i E_i F_i t_i \sum_{j=1}^{n''} \sigma_{stj} F_j + P_b}{\sum_{i=1}^{n'} E_i F_i},$$

где  $n'$  — количество слоев, в которых  $\sigma_i^{H'} \leq \sigma_{sti}$ ;  $n''$  — количество слоев, в которых  $\sigma_i^{H'} > \sigma_{sti}$ .

Напряжения в слоях при упругопластическом расчете

$$\sigma_i^H = (-\beta_i t_i + e') E_i; \quad \sigma_j^H = -\sigma_{stj}.$$

Этот этап расчета остаточных напряжений особенно важен, так как, если не учесть сразу дополнительные пластические деформации, возникающие в момент выхода из волоки, т. е. при разгрузке от значе-

ния осевой силы, равного  $\int_0^{2\pi} \int_0^1 \sigma_{st} \bar{r} d\varphi d\bar{r}$ , до значения  $P_b$ , то при расче-

те остаточных напряжений после полной разгрузки проволоки могут возникнуть значительные искажения в картине распределения остаточных напряжений.

Чтобы учесть упрочнение, связанное с дополнительными пластическими деформациями в слоях, следует при вычислении интенсивности деформаций сдвига для этих слоев  $\varepsilon$  заменить на  $(\varepsilon + |e - e'|)$ .

После выхода из волоки начинается процесс перераспределения и выравнивания температур по сечению и общее охлаждение проволоки. В момент полной силовой разгрузки проволоки распределение температуры по сечению будет подчиняться новой зависимости  $(t - t_0) = f(\bar{r})$ , которая может быть установлена при решении тепловой задачи.

Для определения остаточных напряжений необходимо провести разгрузку проволоки как по механическим, так и по тепловым воздействиям.

В процессе охлаждения проволоки при постоянной силовой нагрузке  $P_b$  возможно возникновение дополнительных пластических деформаций. Правда, нельзя ожидать, что эти деформации будут велики. Вместе с тем, расчет остаточных напряжений разумно проводить лишь в последнем проходе маршрута волочения проволоки, где вследствие высокой суммарной деформации дополнительное упрочнение будет пренебрежимо мало. В этом случае расчет можно вести, пренебрегая дополнительным упрочнением слоев проволоки.

Остаточные напряжения после силовой разгрузки определяются путем алгебраического сложения напряжений при нагружении и разгрузке. Очевидно, полученное путем сложения результирующее напряжение не может быть больше предела текучести материала  $\sigma_{sti}$ , т. е. всегда должно соблюдаться неравенство  $\sigma_i^H + \sigma_i^P \leq \sigma_{sti}$  [87]. Когда это неравенство не выполняется, материал будет испытывать пластическую деформацию. Если известно напряжение при нагрузке  $\sigma_i^H$  и предел текучести  $\sigma_{sti}$ , то наибольшее возможное по абсолютной величине изменение напряжений при разгрузке составит

$$\sigma_i = \sigma_i^H + \sigma_{sti} . \quad (63)$$

Относительная деформация проволоки в процессе охлаждения ее слоев от температуры  $t_i$  до  $t'_i$  в предположении, что все слои проволоки испытывают только упругие деформации,

$$e'_1 = \frac{-\sum_{i=1}^n (\beta'_i t'_i - \beta_i t_i) E'_i F_i - P_b}{\sum_{i=1}^n E_i + F_i} ,$$

где  $\beta'_i t'_i - \beta_i t_i$  — приращение температурного расширения в  $i$ -м слое.

Напряжения в слоях при разгрузке в упругом расчете

$$\sigma_i^P = [ -(\beta'_i t'_i + \beta_i t_i) + e'_1 ] E' .$$

Здесь  $\beta'_i$  и  $t'_i$  — коэффициент температурного расширения и температура  $i$ -го слоя в момент силовой разгрузки.

Если в каком-либо слое  $\sigma_i^{p'} > \sigma_i$  (см. формулу (63)), то необходимо в упругопластическом расчете при разгрузке найти относительную деформацию проволоки

$$e_1 = \frac{-\sum_{i=1}^{n'} (\beta'_i t'_i - \beta_i t_i) E_i + F_i + \sum_{j=1}^{n'} \sigma_{stj} - P_b}{\sum_{i=1}^{n'} E_i F_i}$$

и напряжения в слоях

$$\sigma_i^p = \left[ -(\beta'_i t'_i + \beta_i t_i) + e_1 \right] E_i^+, \quad \sigma_j^p = -\sigma_{stj}.$$

Остаточные напряжения в проволоке после силовой и температурной разгрузки

$$\sigma_i^0 = \sigma_i^u + \sigma_i^p. \quad (64)$$

Поскольку при снятии проволоки с барабана волочильной машины температура проволоки остается выше  $t_0$ , то следует в формуле (64) учесть изменения остаточных напряжений при тепловой разгрузке от температуры конца силовой разгрузки до  $t_0$ .

Таким образом, метод расчленения тел позволяет проводить расчет не только остаточных напряжений в проволоке после волочения, но и временных напряжений на любом этапе силовой или тепловой разгрузки.

#### 4.3. Конечно-элементная постановка задачи определения остаточных напряжений в холоднодеформированных трубах и прутках

Экспериментальный анализ распределения остаточных напряжений является трудоемкой процедурой, а результаты далеко не всегда однозначны. Расшифровка рентгенограмм даже при наличии каче-

ственных эталонных образцов не всегда позволяет определить даже род остаточных напряжений в реальных поликристаллических материалах.

Поскольку на практике производства металлоизделий наибольший интерес представляют напряжения первого рода, теоретический анализ, с целью прогнозирования наиболее вероятной схемы распределения в объеме остаточных напряжений, может оказаться весьма эффективным и сравнительно дешевым методом анализа.

Современные пакеты прикладных программ при конечно-элементной постановке упругопластических задач дают возможность наблюдать возникновение при деформационной и тепловой обработке неоднородных температурных и деформационных полей, а также изменение напряженного состояния в объеме металлоизделий при силовой и тепловой нагрузке.

Здесь выполнена проверка возможности применения для анализа распределения остаточных напряжений в прутках и трубах после холодного волочения пакета прикладных программ DEFORM-2D. Описание свойств этого инженерного программного комплекса есть в учебном пособии [83].

DEFORM<sup>TM</sup> — специализированный инженерный программный комплекс, предназначенный для анализа процессов обработки металлов давлением, термической и механической обработки. DEFORM позволяет проверить, отработать и оптимизировать технологические процессы непосредственно за компьютером, а не в ходе экспериментов на производстве методом проб и ошибок. Благодаря этому существенно сокращаются сроки выпуска продукции, повышается ее качество и снижается себестоимость. Комплекс разработан американской компанией Scientific Forming Technologies Corporation (SFTC), являющейся лидером в области моделирования процессов обработки металлов давлением. DEFORM позволяет моделировать практически все процессы, применяемые в обработке металлов давлением (ковка, штамповка, прокатка, прессование и др.), а также операций термической обработки (закалка, старение, отпуск) и механообработки (фрезерование, сверление и др.).

DEFORM применяется по всему миру как на промышленных предприятиях, так и в научно-исследовательских институтах и технических университетах, является самым распространенным программным комплексом для моделирования процессов обработки металлов давлением.

### Преимущества DEFORM:

- универсальность — программа DEFORM позволяет моделировать широкий круг технологических процессов, применяемых на производстве;
- совместимость с большинством программных пакетов для создания геометрических моделей и генерации конечно-элементной сетки;
- большие возможности по самостоятельной генерации конечно-элементной сетки;
- возможность использования различных моделей пластичности материала;
- большая база данных по характеристикам материалов и кузнечно-прессового оборудования, а также широкие возможности по их редактированию и добавлению;
- возможность моделирования различных условий трения между заготовкой и инструментом;
- широкие возможности моделирования различных видов движения инструмента;
- простой и удобный интерфейс.

Программный комплекс DEFORM имеет гибкую модульную структуру, позволяющую пользователю выбрать и приобрести оптимальный набор модулей под номенклатуру решаемых задач.

DEFORM-2D — конечно-элементная система моделирования, предназначенная для анализа двумерного (2D) поведения металла при различных процессах обработки давлением. DEFORM-2D предоставляет важную информацию о течении материала в штампе и распределении температур во время процессов деформирования. DEFORM-2D используется ведущими мировыми компаниями для моделирования таких процессов, как ковка, штамповка, прессование, вытяжка, высадка, и многих других осесимметричных процессов обработки металлов давлением.

DEFORM-2D использует последние достижения в области моделирования технологических процессов. Мощный решатель модуля DEFORM-2D способен анализировать сложные взаимодействия нескольких деформируемых объектов с различными свойствами при различных процессах обработки металлов давлением. Это позволяет точно и реалистично моделировать процессы деформирования металла в условиях производства.

Интеллектуальный генератор сетки способен автоматически построить и оптимизировать конечно-элементную сетку, перестраивая ее в случае необходимости в ходе расчета: генератор сетки использует промежуточные результаты расчета и строит более густую сетку в областях, где требуется высокая точность решения. Кроме того, пользователь имеет возможность самостоятельно настраивать плотность сетки, распределение ее элементов по сечению и параметры ее автоматического перестроения.

DEFORM-2D имеет простой и удобный русифицированный Windows-интерфейс, не требующий длительного изучения. Специальные шаблоны облегчают новичкам работу с системой и помогают быстро задавать несложные процессы и запускать их на счет.

DEFORM-2D позволяет решать задачи деформирования, теплопередачи, а также разделительные операции, такие как вырубка и пробивка. Дополнительно к этому есть возможность подключения модуля DEFORM-HT, что позволяет моделировать всю технологическую цепочку, начиная с разделительных заготовительных операций, операции нагрева заготовки, формообразующих операций и заканчивая операциями окончательной термической обработки.

Задачи волочения с успехом можно решать и в среде DEFORM-3D, но это приводит к увеличению времени счета, а уточнение решения несущественно. Однако при анализе любых неосесимметричных схем деформирования, нагрева и охлаждения труб (печной нагрев, охлаждение на стеллажах, правка знакопеременным изгибом) использование пакета DEFORM-3D становится вынужденным.

Упругопластические задачи при достаточно большом количестве конечных элементов решаются иногда за десятки часов, поэтому возможность параллельных вычислений является существенным достоинством комплексов DEFORM.

Параллельные вычисления позволяют использовать преимущества многопроцессорных рабочих станций и кластеров, а именно использовать максимально подробную сетку и получить значительное сокращение времени расчета при решении задач моделирования процессов обработки металлов давлением, термической и механической обработки. Дальнейшая оптимизация методов параллельных вычислений является одной из приоритетных задач в развитии DEFORM.

Выбор вычислительной техники для решения задач с помощью программного комплекса DEFORM зависит от их сложности:

- однопроцессорные компьютеры могут использоваться для решения задач малой сложности с не очень большим количеством элементов;
- однопроцессорные ПК на базе 2-и 4-ядерных процессоров дают значительное ускорение процесса моделирования по сравнению с одноподъядерными процессорами, позволяют за приемлемое время решать достаточно сложные задачи;
- двухпроцессорные рабочие станции с 2-и 4-ядерными процессорами позволяют решать практически все наиболее сложные задачи обработки металлов давлением за время, не превышающее 20...30 часов (см. материал по сравнительному тестированию производительности программы DEFORM на процессорах Intel Core i7 Nehalem);
- использование кластеров с 4...8 и более процессорами позволяет еще больше ускорить процесс моделирования, что оправдано для самых сложных задач с сеткой очень большой размерности.

Выигрыш, который дает применение параллельных вычислений при решении задач обработки металлов давлением с помощью комплекса DEFORM, в значительной степени зависит от формы заготовки, количества конечных элементов, используемой вычислительной техники и операционной системы.

Решены тестовые упругопластические задачи волочения труб и прутков из стали 08X18 H10 T с полной силовой и тепловой разгрузкой после волочения с фиксированием конечного распределения остаточных напряжений. При расчете остаточных напряжений использовалась известная теорема о разгрузке [7], согласно которой пластические деформации при разгрузке полностью исключаются.

Геометрическая постановка задачи выполнена в CAD-пакете и транслирована в DEFORM-2D. После создания моделей инструмента и заготовки в сборке они сохраняются в формате «.stl.», с которым программа DEFORM может работать.

При расчете напряженно-деформированного состояния решается также связанная задача теплопроводности. При этом учитывается тепловыделение от пластической деформации и контактного трения, а также потери тепла теплопередачами, задаваемой коэффициентом теплопередачи  $a$  (кВт/м<sup>2</sup>·°К), от заготовки к инструменту.

Заготовки трубы и прутка задавались конечной длины. При этом за стационарную фазу волочения принималась деформация участка,



отстоящего от исходного сечения выхода из волокна на расстоянии не менее 5 диаметров трубы (прутка). При разгрузке протянутого образца осуществлялось перераспределение тепла по сечению стенки трубы или прутка, а потери тепла учитывались коэффициентом конвективной теплоотдачи.

Механические свойства металла трубы и прутка задавались таблично с линейной интерполяцией между заданными значениями. Зависимость  $\sigma_s$  от степени деформации и температуры принималась по литературным данным.

Контактное трение описывалось законом Кулона и коэффициент трения принимался постоянным на всей контактной поверхности в течение всего процесса волочения.

Теплофизические свойства материалов волокна и обоймы принимались для уровня температуры 50...100 °С. Размеры инструмента реальные и соответствуют используемым в промышленности.

Распределение радиальных (*a*), осевых (*b*) и тангенциальных (*c*) остаточных напряжений после безправочного волочения трубы 16×4 мм с обжатием по диаметру  $\varepsilon = 0,2$  и после 10-минутной тепловой разгрузки на спокойном воздухе (20 °С) приведены на рис. 29. Волочение осуществлялось со скоростью 1 м/с при коэффициенте трения  $\mu = 0,08$ . Коэффициент теплопередачи от трубы к волоку принят  $a = 10 \text{ кВт/м}^2 \cdot \text{°К}$ , а коэффициент конвективной теплоотдачи  $a_k = 50 \text{ кВт/м}^2 \cdot \text{°К}$ . При расчете угол наклона образующей конической рабочей части волокна варьировался:  $\alpha = 5; 10; 15; 20^\circ$ . На графиках *S* — радиальная координата по толщине стенки трубы. При этом *S* = 0 соответствует внутренней поверхности трубы.

Остаточные напряжения в холоднотянутых трубах 16×4 мм из стали 12Х18 Н10 Т после безправочного волочения с обжатием по диаметру 20 % показаны на рис. 30. Коэффициент трения изменялся от 0,08 до 0,12 и практически не повлиял на величину и распределение всех остаточных напряжений.

Влияние исходной толщины на величину и распределение остаточных напряжений в стенке трубы диаметром 16 мм при обжатии по диаметру 20 % показано на рис. 31.

Изменение скорости волочения в диапазоне от 0,2 до 1,0 м/с практически не повлияло на величину и распределение остаточных напряжений в стенке трубы 16×4 мм из стали 12Х18 Н10 Т после безправочного волочения с обжатием  $\varepsilon = 0,2$  (см. рис. 32).

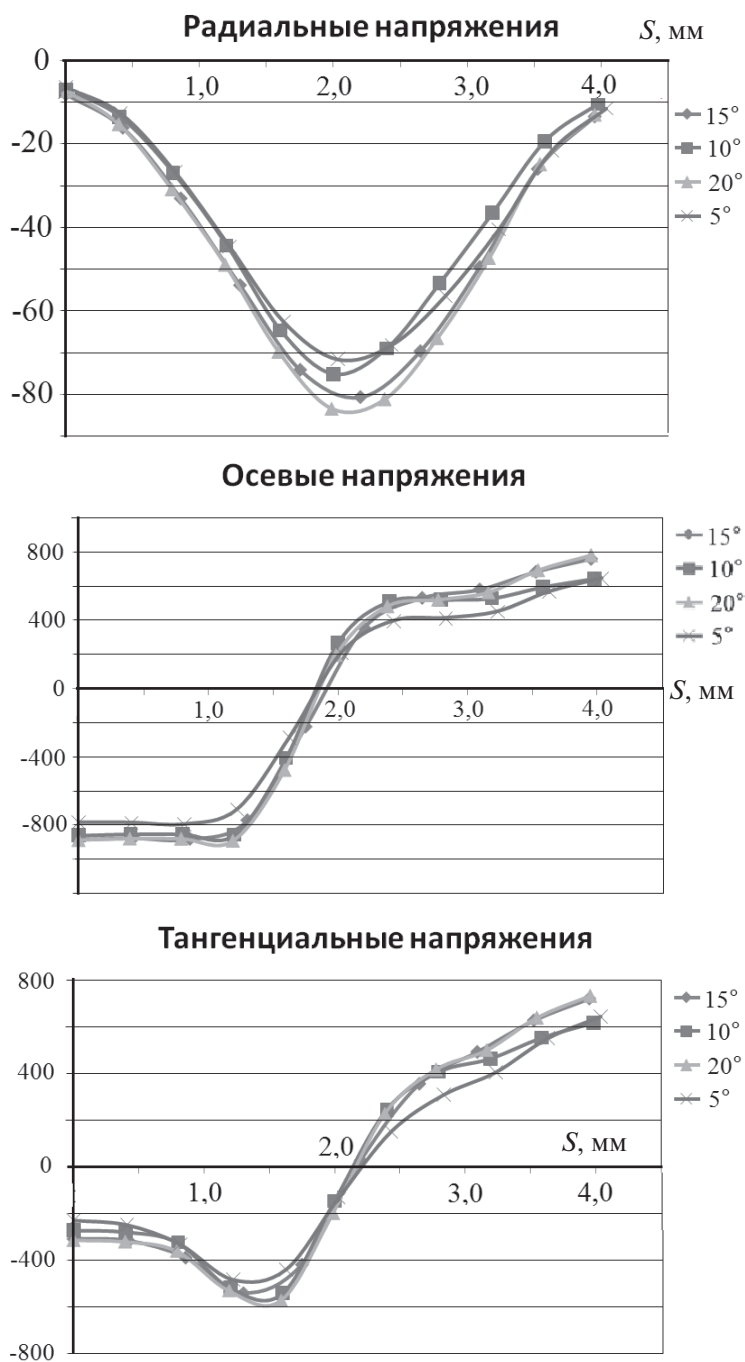


Рис. 29. Остаточные напряжения в стенке трубы 16×4 мм после безоправочного волочения с обжатием по диаметру 20 %

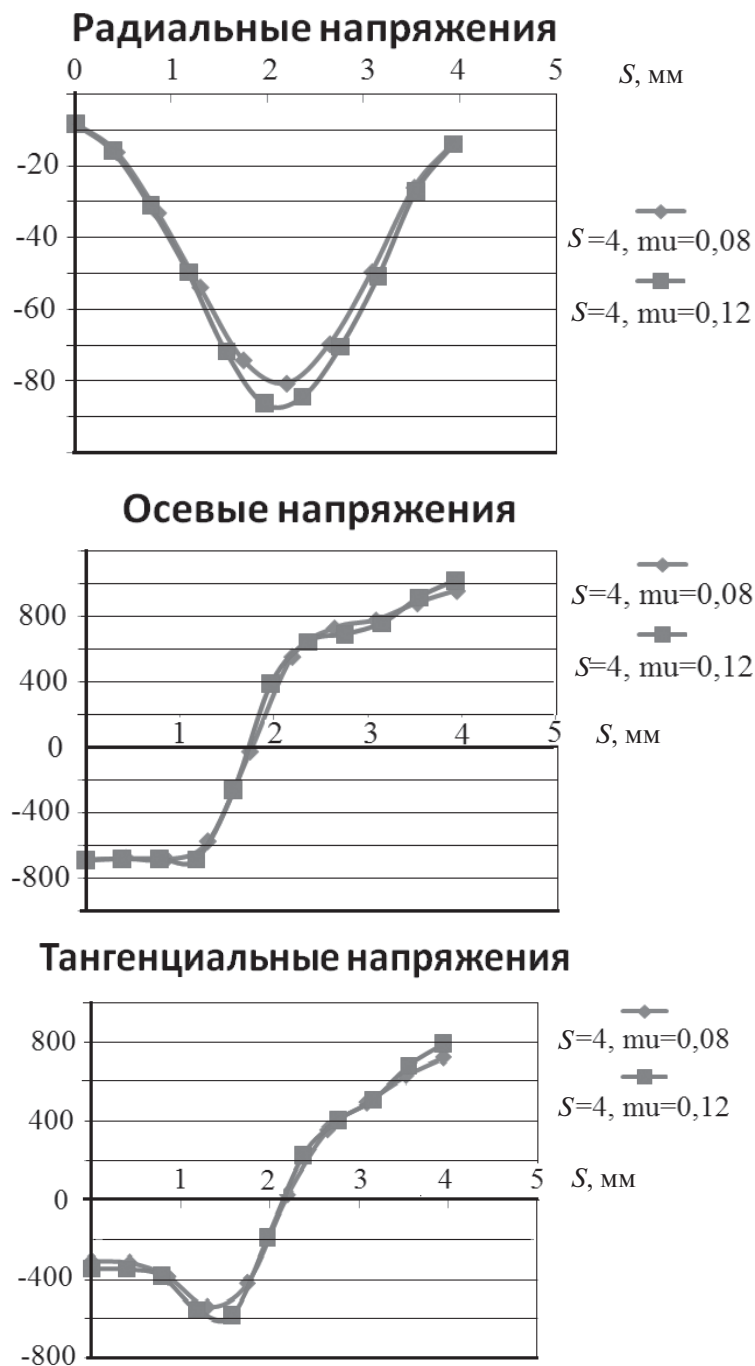


Рис. 30. Остаточные напряжения в стенке трубы  $16 \times 4$  мм из стали 12Х18 Н10 Т после волочения с  $\varepsilon = 0,2$ ;  $\alpha = 15^\circ$

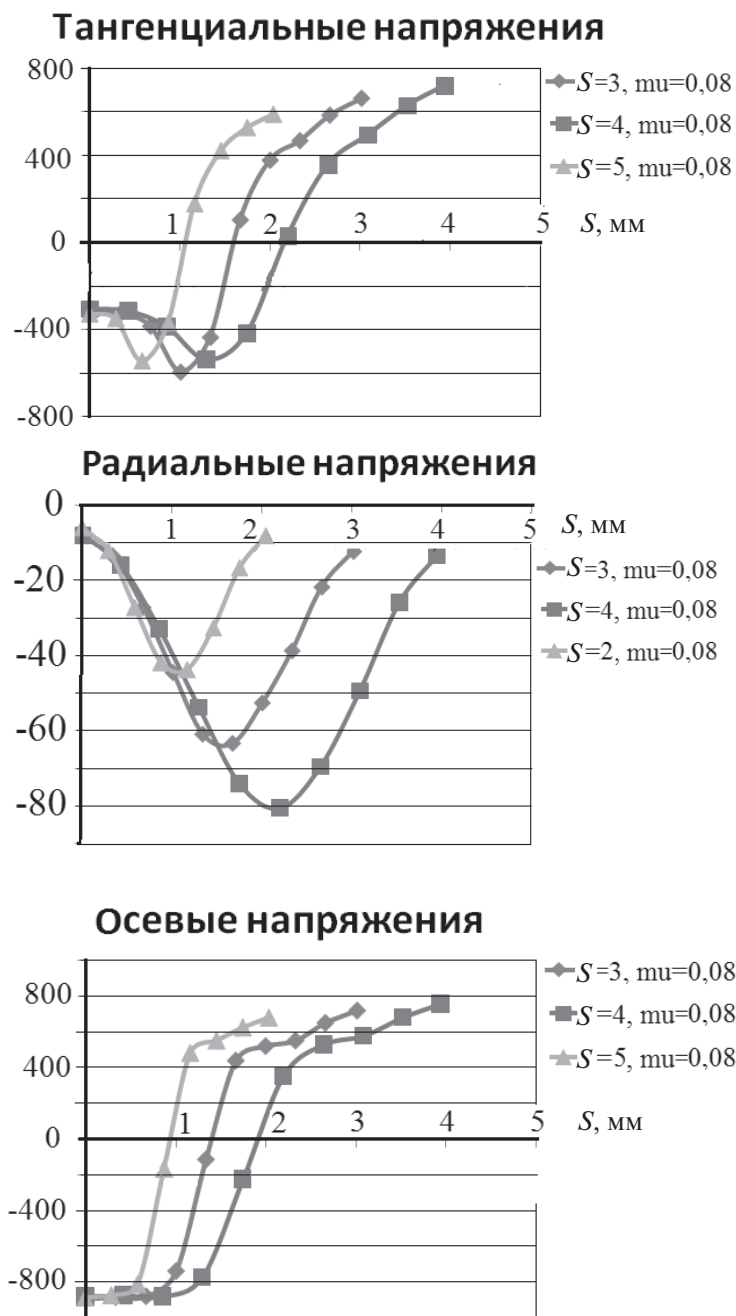


Рис. 31. Остаточные напряжения в стенке трубы диаметром 16 мм из стали 12Х18 Н10 Т после безправочного волочения с обжатием 20 %;  $\alpha = 15^\circ$ ;  $\mu = 0,08$ ;  $V = 1$  м/с

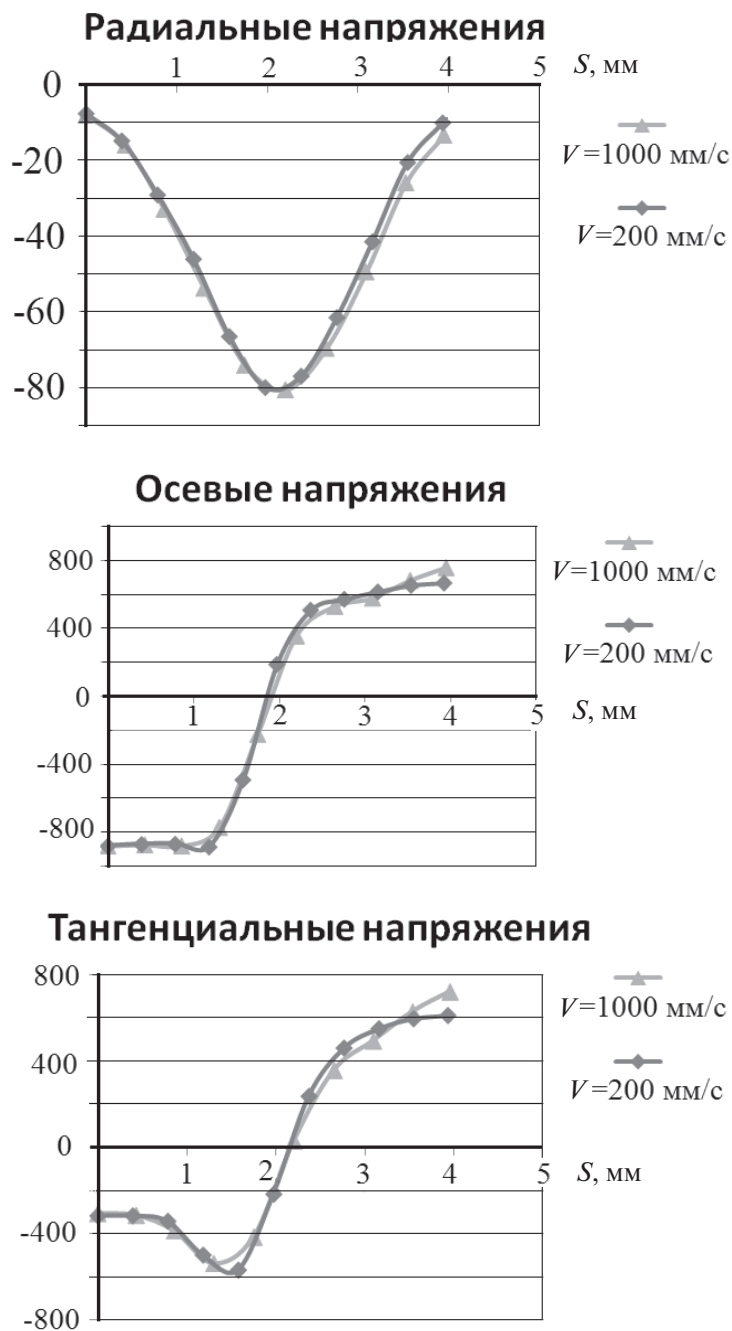


Рис. 32. Остаточные напряжения в стенке трубы  $16 \times 4$  мм из стали 12Х18 Н10 Т после безправочного волочения с обжатием по диаметру 20%;  $\alpha = 15^\circ$ ;  $\mu = 0,08$

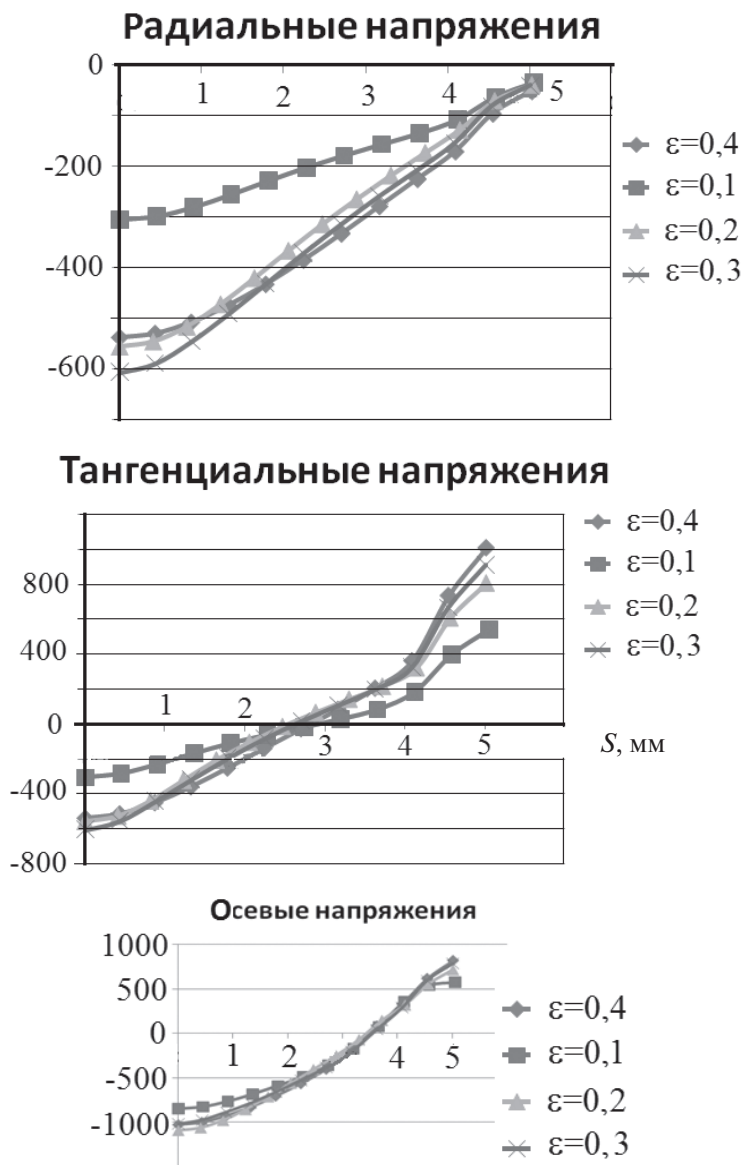


Рис. 33. Распределение остаточных напряжений по радиусу сечения прутка исходного диаметра 10 мм из стали 12Х18 Н10 Т после волочения с различными обжатиями  $V = 1$  м/с;  $\mu = 0,08$ ;  $\alpha = 6^\circ$

Поскольку наибольшее количество опытных данных по остаточным напряжениям касается холодного волочения прутков и проволоки, то в качестве тестовой задачи удобно рассмотреть случай воло-

чения прутка. Волочение со скоростью 1 м/с выполнено через волоку  $\alpha = 6^\circ$  при коэффициенте трения  $\mu = 0,08$ . Материал прутка — сталь 12Х18 Н10 Т. Перед волочением прутки отожжены, а сопротивления деформации в функции обжатия заданы таблично. Коэффициент теплопередачи от прутка к волоке задан равным  $a = 5 \text{ кВт/м}^2 \cdot \text{К}$ . При расчете варьировалось обжатие  $\varepsilon = 2 \ln d_0/d_k$ , где  $d_0$  и  $d_k$  — соответственно диаметры прутка до и после волочения. Начальный диаметр во всех случаях остается неизменным  $d_0 = 10 \text{ мм}$ . Результаты расчета в виде графиков распределения остаточных напряжений по радиусу сечения прутка после 15-минутной тепловой разгрузки представлены на рис. 33.

Сопоставляя полученные расчетные данные с приведенной в работах [37–40] опытной информацией, можно отметить подобные картины распределения по сечению холоднотянутых прутков. При волочении прутков из нержавеющей стали в расчете получен более широкий градиент по радиусу осевых остаточных напряжений, чем после волочения проволоки из углеродистых сталей. Это можно объяснить низкой теплопроводностью коррозионно-стойких сталей. В заключение можно отметить удовлетворительное качество расчетов остаточных напряжений при упругопластическом решении задач волочения в конечно-элементной постановке.

## 5. Остаточные напряжения в холоднодеформированных проволоке, прутках и трубах и влияние параметров обработки

---

### 5.1. Остаточные напряжения в проволоке

---

**В** области изучения остаточных напряжений, возникающих в проволоке при волочении, проведено много обстоятельных как экспериментальных, так и теоретических исследований. Природа возникновения этих напряжений состоит в неравномерности пластической деформации и неравномерности температурного поля, имеющего место при протяжке металла через коническую волоку. Возникновение тепловых напряжений в протянутом материале, которые, как показал Е. В. Пальмов в работе [84], могут достичь значительной величины, объясняется разностью температур внешних и внутренних слоев проволоки.

На величину и характер распределения остаточных напряжений по поперечному сечению наклепанной стальной проволоки оказывают влияние: подготовка поверхности металла к волочению; величина суммарного обжата; угол рабочей зоны волоки; содержание углерода в стали; величина единичных обжатий при постоянном суммарном обжатии; способ патентирования и конструктивные особенности оборудования [6].

Процесс подготовки поверхности катанки к волочению заключается в удалении с нее окалины, образовавшейся после горячей прокатки. Несмотря на высокую температуру при выходе из последней клетки стана, в катанке образуются остаточные напряжения из-за различного охлаждения водой бунтов катанки на барабанах моталки. Поэтому



роль процесса подготовки поверхности катанки к волочению состоит не только в очищении ее от окалины, но и в частичном снятии остаточных напряжений, так как при этом с поверхности катанки удаляется некоторый слой металла, в котором имеются растягивающие напряжения. При механическом удалении окалины, когда перегиб катанки (как при рихтовке) происходит в нескольких плоскостях, остаточные напряжения будут сниматься более резко.

Проведенные автором в работе [85] исследования показывают, что максимальные растягивающие напряжения на поверхности проволоки с увеличением суммарного обжата увеличиваются примерно до 80 %. При дальнейшем повышении суммарного обжата эти напряжения остаются приблизительно одинаковыми у низко- и среднеуглеродистых сталей (0,15...0,45 % углерода) и несколько уменьшаются у высокоуглеродистых сталей (0,6...0,8 % углерода). Максимальные сжимающие напряжения быстро возрастают до суммарного обжата около 70 %. В дальнейшем их возрастание замедляется и по достижении обжата 80 % они почти не изменяются.

Наиболее важным вопросом в производстве холодноотянутой стальной проволоки является вопрос об оптимальной величине единичных обжатов. Их величина ограничивается тем, что прочность материала всегда должна быть выше напряжений, возникающих при волочении, так как в противном случае появляются так называемые «затяжки», ведущие к браку проволоки. Самыми первыми крупными и обстоятельными работами, посвященными данному вопросу, были исследования Бюлера [3, 86, 87]. Остаточные напряжения замерялись на прутках больших диаметров (порядка 50 мм) из меди и стали с различным содержанием углерода после волочения с малыми обжатами. Остаточные напряжения определялись по величине упругой деформации вытянутых образцов после послойной односторонней фрезеровки.

Именно Бюлер открыл эффект резкого снижения остаточных напряжений в протянутой проволоке при использовании малых обжатов. На рис. 34, приведенном в работе [87], дано распределение осевых и тангенциальных остаточных напряжений по сечению прутков, протянутых с различными обжатами. Прутки были изготовлены из стали St52 (0,52 % углерода).

Из графиков видно, что на поверхности прутка остаточные напряжения приобретают большие значения даже при сравнительно малых обжатах.

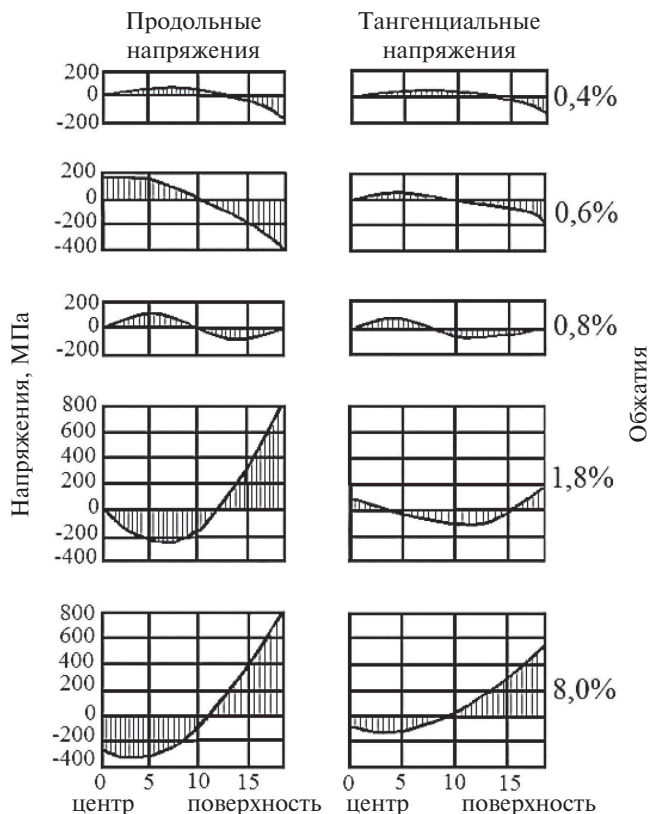


Рис. 34. Распределение остаточных напряжений в сечении прутка

На рис. 35 представлено распределение осевых, тангенциальных и радиальных напряжений при волочении в два прохода, а на рис. 36 — в три прохода с последовательным уменьшением величины обжатия [87]. Последующие смягчающие протяжки позволяют снизить величину значительных остаточных напряжений, возникающих в первом проходе.

Поскольку качество проволоки в основном определяется величиной и знаком остаточных напряжений на поверхности проволоки, то очень наглядной представляется зависимость поверхностных продольных и тангенциальных внутренних напряжений от величины обжатия (см. рис. 37).

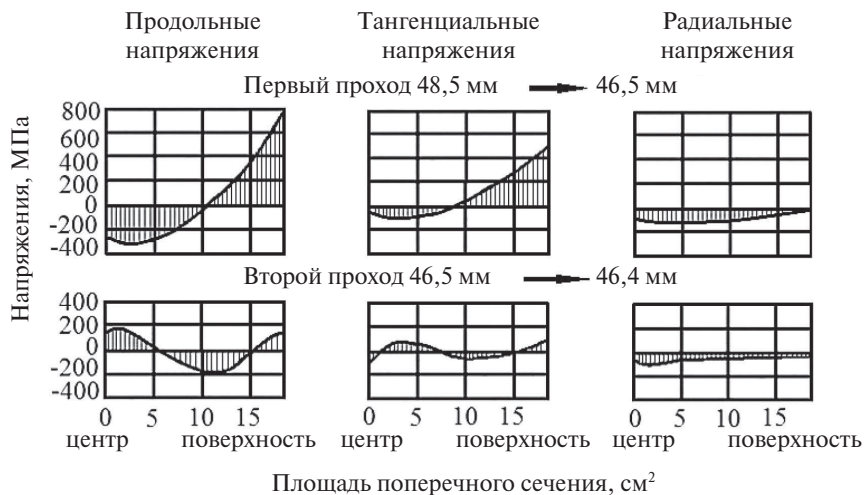


Рис. 35. Распределение остаточных напряжений после волочения в два прохода

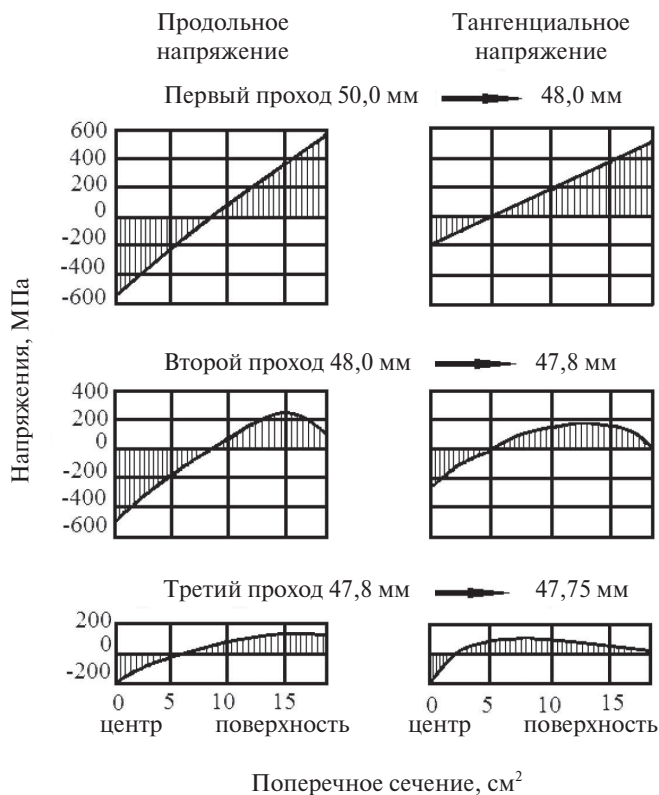


Рис. 36. Распределение остаточных напряжений при волочении в три прохода



Рис. 37. Зависимость поверхностных остаточных напряжений от относительного обжатия при волочении

В результате многочисленных исследований Бюлер пришел к следующим выводам [6]:

1. При незначительном обжатии (от 0,4 до 1 %) на поверхности прутка возникают сжимающие напряжения, а в середине — растягивающие. Объясняется это тем, что благодаря совместному действию усилий трения между стенками волокна и поверхностью прутка и радиальных сжимающих усилий наружные зоны прутка растягиваются в продольном направлении. При выходе из волокна пластически удлиненная поверхностная зона прутка стремится удлинить также и его середину, которая подвергается лишь упругим напряжениям.

2. При обжатии прутка более чем на 1 % знак напряжений меняется: поверхностные слои подвергаются растягивающим напряжениям, а внутренние — сжимающим. При этом самые высокие напряжения имеет поверхность протянутого прутка.

3. При обжатиях порядка 0,9 % сжимающие напряжения в поверхностных слоях равны нулю. При увеличении обжатия, возникающие растягивающие напряжения сначала быстро возрастают, но при деформации более 1,5 % их рост становится весьма незначительным.

Подробное исследование напряжений на проволоке диаметром 3 мм из стали с содержанием углерода 0,79 % провел Н. М. Лапотышкин [88]. Проволока была получена из заготовки диаметром 6 мм с суммарным обжатием 70 %, но с различными единичными обжатиями. Лапотышкин установил, что при волочении с единичными обжатиями

0,4...1 % во внешних слоях возникают сжимающие напряжения; с повышением единичных обжатий эти напряжения переходят в последовательно увеличивающиеся растягивающие напряжения, которые при обжатиях 12...26 % стабилизируются, а при обжатиях больших 26 % начинают убывать и при обжатиях 30—35 % достигают нулевых значений.

В работе [6] утверждается, что при единичных обжатиях, меньших 7 %, во внешних слоях проволоки возникают сжимающие напряжения, достигающие максимума при 0,7 %. При обжатиях более 7 % эти напряжения переходят в растягивающие, которые с ростом единичных обжатий от 13 до 44 % резко уменьшаются.

На Белорецком металлургическом комбинате для уменьшения растягивающих напряжений во внешних слоях высоконаклепанной стальной проволоки заканчивают волочение с единичными обжатиями в предпоследнем проходе 8...10 %, а в последнем — 3...5 %, или применяют по всему маршруту обжатия 10...12 %.

И. Л. Перлин в работе [89] рекомендует вести волочение при максимальных единичных обжатиях, а в последних проходах для выравнивания напряжений снижать обжатия до 0,8...1,5 %.

Результаты исследований, выполненных в Уральском политехническом институте, по определению величины остаточных напряжений в проволоке из стали различных марок показывают, что единичное обжатие является наиболее существенным фактором, влияющим на величину и распределение осевых остаточных напряжений.

В. Т. Козлов и В. Д. Высочин также указывают, что величина осевых остаточных напряжений уменьшается при уменьшении частных обжатий [90]. Ими получено при постоянном угле рабочего конуса волоки ( $\alpha = 5^\circ$ ), что осевые остаточные напряжения до определенных значений частного обжатия возрастают, а затем в связи с наличием пластических деформаций после выхода из волоки — падают [91].

Авторы статьи [40] в выводах пишут, что существенное влияние на величину остаточных напряжений в поверхностных слоях проволоки оказывает распределение единичных обжатий по маршруту волочения. Применение жестких (30...33 %) обжатий по маршруту с облегченной (14...16 %) последней протяжкой позволяет снизить остаточные напряжения в 2,8...3,0 раза по сравнению с другими вариантами маршрута.

С. Ф. Бобылева и др. (а. с. СССР № 201301) предлагают способ изготовления высокопрочной пружинной проволоки, включающий многократное волочение и дальнейший низкотемпературный отпуск при

температуре 240...260 °С, где с целью предотвращения расслаивания проволоки до и после низкотемпературного отпуска осуществляется волочение с малыми обжатиями за проход порядка 10...12 %.

Что касается влияния величины угла рабочего конуса волокни на возникающие после волочения остаточные напряжения, то здесь мнения большинства исследователей совпадают.

Б. И. Гайдученко в работе [6], исходя из опытных данных по волочению канатной проволоки, указывает, что увеличение угла рабочего конуса волокни в два раза увеличивает максимальную величину растягивающих напряжений в полтора — три раза в зависимости от величины частных обжатий.

Установлено, что при постоянном обжатии с уменьшением угла конусности волокни остаточные осевые напряжения на поверхности проволоки уменьшаются [91].

Согласно [40], угол рабочей зоны волокни в пределах исследованных значений оказывает влияние на остаточные напряжения: уменьшенные углы при применении жестких единичных обжатий по маршруту с облегченной последней протяжкой существенно (в 2,5...3,2 раза) снижают остаточные напряжения. Нормальный, принятый на заводах, угол, а также угол больше нормального не оказывают существенного влияния на величину остаточных напряжений. При других маршрутах влияние угла рабочей зоны незначительно.

Эксперименты Т. Нишиока при волочении проволоки из стали различных марок (содержание углерода от 0,16 до 0,81 %) с углами рабочей зоны от 2,5 до 50 ° показывают, что при увеличении угла в 2, 4, 6 и 8 раз максимальная величина остаточных растягивающих и сжимающих напряжений возрастает в 2...2,5 раза [90]. С ростом угла рабочей зоны волокни увеличивается и составляющая нормального напряжения на контактной поверхности, параллельная оси канала, что приводит к большему отставанию периферийных слоев от центральных и, следовательно, к большим дополнительным осевым остаточным напряжениям.

Содержание углерода в стали также влияет на величину остаточных напряжений [6]. Результаты исследований волочения проволоки из стали, содержащие от 0,16 до 0,81 % углерода, показывают, что напряжения растяжения в ней растут при содержании углерода примерно до 0,40...0,45 %, а затем падают. При этом напряжения сжатия непрерывно возрастают.

Определяя рентгеновским методом величину остаточных напряжений второго рода в патентированной и затем протянутой проволоке с различным содержанием углерода, работники ЦЗЛ Белорецкого металлургического комбината обнаружили, что:

1. Остаточные напряжения второго рода в тянутых образцах с различным содержанием углерода почти не отличаются друг от друга по величине.

2. В образцах тянутой проволоки с различным содержанием углерода величина остаточных напряжений второго рода выше, чем в образцах после патентирования.

3. С увеличением содержания углерода в образцах патентированной проволоки остаточные напряжения второго рода увеличиваются.

В. Я. Зубов еще в 1965 году установил, что проволока, полученная в одинаковых условиях, имеет различную величину остаточных напряжений в поверхностных слоях при различном содержании углерода: 250 МПа для стали Ст10, 450 МПа для стали Ст45 и 550 МПа для стали У8 А.

Влияние скорости волочения на величину остаточных напряжений в проволоке состоит в следующем [6]: чем выше скорость волочения, тем меньше трение и, следовательно, меньше остаточные напряжения в материале проволоки, что обусловлено, в свою очередь, повышением скорости [92]. Что касается влияния смазки, то чем она лучше, то есть чем меньший коэффициент трения она создает на границе поверхностей проволоки и волоки, тем меньше будут контактные касательные напряжения, а значит, и растягивающие остаточные напряжения. Опытные данные показывают, что при плохой смазке остаточные напряжения в поверхностных слоях проволоки возрастают настолько, что сами могут вызвать разрушение металла.

В. Т. Козлов и В. Д. Высочин также указывают на уменьшение осевых остаточных напряжений при улучшении условий трения на поверхности волоки [90, 91]. Они провели опыты по определению напряжений волочения и остаточных напряжений при различных условиях на поверхности волоки. Волочение велось через волоку с углом  $\alpha = 5^\circ$ , с обжатием 22 % канатной проволоки, с  $\sigma_{ср} = 1700$  МПа. Д. Г. Кристоферсон и Х. Найлор, исследуя искажения сеток, нанесенных на продольных разрезах проволоки по плоскости диаметра, установили, что при волочении в режиме гидродинамического трения в волоке имеет место более равномерная деформация по сечению проволоки, чем при



волочении в режиме граничного трения [93]. Этот опытный факт, о существовании которого предсказывала теория течения металла в волоке, дает основание предположить, что в готовой проволоке, получаемой методом волочения в режиме гидродинамического трения, распределение остаточных напряжений по сечению будет более благоприятным.

Однако, как установлено при экспериментальной проверке в лаборатории НИИМетиза, прочность у канатной проволоки диаметром 2,1 мм, полученной при волочении в режиме гидродинамического трения на жидких смазках через волоки с цилиндрическими насадками, ниже, чем прочность проволоки, которая получена по обычной технологии; число скручиваний у обоих типов проволоки одинаковое; по числу гибов более высокие показатели у проволоки, полученной при волочении в режиме гидродинамического трения.

Таким образом, связь между условиями трения на контактной поверхности и качеством канатной проволоки однозначно еще не установлена, отсюда следует, что нет пока еще и достаточно четкой связи между величиной остаточных напряжений, возникающих в холодно-тянутой проволоке, и качеством последней.

Механику возникновения остаточных напряжений в проволоке после холодного волочения и характер их распределения по сечению изучали на основе результатов решения связанной задачи термоупругопластичности Поздеев А. А., Няшин Ю. М., Трусов П. В., которые считают, что численное решение с помощью МКЭ дает более надежные результаты в сравнении с экспериментальными методами и, в частности, с методом стравливания [58]. В работе [58] также отмечаются некоторые недостатки формулы Хейна и ее обобщения, представленные Высочиным В. Д. в работе [94] в виде

$$\sigma_z(\rho) = \frac{E}{l_0} \left[ -\frac{\rho}{2} \frac{d\lambda}{d\rho} - \lambda(\rho) \right],$$

где  $\rho$  — относительный радиус сечения проволоки;  $E$  — модуль упругости;  $\lambda$  — относительное удлинение при стравливании;  $l_0$  — длина стравливаемого участка.

Особенность состоит в том, что учитываются только продольные деформации. Но при стравливании меняется распределение тангенциальных и радиальных напряжений, что влияет на удлинение [7].



Подробно рассмотрены результаты решения задачи для волочения проволоки из стали 80 на прямоточном стане Белорецкого металлургического комбината по маршруту 7,2–6,6–5,5–5,0 мм.

Установлено, что температура в центре сечения проволоки за время волочения поднимается до 335 °С, контактный разогрев достигает 680 °С. Неравномерность температурного поля в поперечном сечении на выходе из волок увеличивается с 250 °С в первой волоке до 350 °С в последней волоке.

В каждой волоке по мере прохождения сечением проволоки конической части температура растет, что наблюдается до половины калибрующего пояска. Однако температура в центре не меняется. После выхода из волоки температура поверхности быстро падает. Уже на расстоянии 100 мм от выхода волоки перепад температуры в сечении уменьшается с 150 °С до 40 °С в первой волоке и с 350 °С до 60 °С в последней волоке. Часть тепла передается центральным слоям проволоки, а часть рассеивается в окружающую среду. Повышение температуры в центре сечения после завершения пластической деформации составляет от 45 °С в области последней волоки. На волочильных барабанах проволока охлаждается на 10...45 °С.

Что касается напряженного состояния, то оно носит циклический характер. На входе в волоку продольные напряжения в центре растягивающие, на поверхности — сжимающие. Напряжения растяжения в осевой зоне достигают максимума  $(1,2...1,3)\sigma_s$  в конической части волоки и уменьшаются в калибрующей части. При разгрузке после выхода проволоки из волоки вследствие больших вытяжек центральных слоев напряжения растяжения переходят в сжимающие. На поверхности проволоки сжимающие продольные напряжения увеличиваются по мере обжатия и достигают максимума. Далее они уменьшаются к выходу из конической части, а в калибрующей части волоки переходят в растягивающие напряжения. При разгрузке они возрастают до  $(1,3...1,4)\sigma_s$ . Далее вновь уменьшаются и в зоне внеконтактной деформации перед следующей волокой снова переходят в сжимающие.

Эти напряжения остаются в проволоке после частичной разгрузки на волочильных барабанах. Полной разгрузки, кроме последней волоки, не происходит, поскольку процесс волочения на прямоточном стане всегда проводится с противонатяжением.

Компоненты остаточных напряжений вследствие упрочнения металла увеличиваются по длине стана от прохода к проходу. На поверх-

ности проволоки остаточные продольные и окружные напряжения растягивающие и достигают величины  $(0,7...0,8)\sigma_s$ . Радиальные напряжения на поверхности, естественно, равны нулю. В осевой зоне проволоки все компоненты остаточных напряжений сжимающие. При этом радиальные и окружные остаточные напряжения практически постоянны при  $r/R \leq 0,4$ , где  $r$  — текущий радиус сечения проволоки,  $R$  — наружный радиус. Сжимающие продольные остаточные напряжения имеют максимум при  $r/R = 0,4$ , к центру проволоки уменьшаются на 50 %, а к поверхности уменьшаются до нуля при  $r/R = 0,7$  и переходят в растягивающие.

Остаточные напряжения в проволоке самоуравновешены. Продольные уравновешены распределением по сечению, а окружные и радиальные — за счет осевой симметрии. В волоке центральные слои металла получают большее удлинение, чем периферийные. Выравнивающее действие упругих областей проволоки приводит к тому, что центральные слои при разгрузке укорачиваются и все компоненты нормальных напряжений в центре становятся сжимающими. Это подтверждается экспериментальными данными [95].

При пластической деформации даже с небольшой степенью деформации остаточные напряжения определяются только неоднородностью деформации и градиентом температуры на последнем этапе, но не зависят от остаточных напряжений предшествующей обработки. Таким образом, авторы в работе [58] делают заключение, что при волочении остаточные напряжения практически определяются характером деформации в последней волоке. Влияние предшествующей деформации сказывается прежде всего на характере температурного поля металла проволоки в волоке, физико-механических свойствах металла и в меньшей степени — на расположении зон упругого и пластического деформирования. Уровень остаточных напряжений в холоднотянутой проволоке очень высок. Например, при волочении стали 80 растягивающие продольные тангенциальные остаточные напряжения на поверхности достигают значений до 1000 МПа, что составляет до 60 % от предела текучести данной стали в наклепанном состоянии.

В работе [96] рассмотрено влияние обжатий, углов волоки и смазок на величину и распределение остаточных напряжений в проволоке, и особенности волочения прутков и проволоки через сдвоенные волокна.

Экспериментальным путем (методом поперечного шлица) установлено, что при волочении стальных углеродистых прутков при очень

малых обжатиях на поверхности появляются продольные и тангенциальные сжимающие остаточные напряжения, которые дают минимум при  $\varepsilon = 1,0 \dots 0,8 \%$ . Эти напряжения при  $\varepsilon = 2,0 \%$  меняют свой знак и становятся растягивающими. Они возрастают с увеличением обжатий и принимают максимальные значения при  $\varepsilon = 5 \dots 20 \%$ . После этого они снова уменьшаются. Из рассмотрения характера опытных зависимостей авторы в работе [96] приходят к заключению, что поверхностные остаточные напряжения при очень больших обжатиях превращаются вновь в сжимающие. Это подтверждено опытами по волочению стальной проволоки. Подробное описание связи между деформациями и возникающим при этом остаточным напряженным состоянием дано в работе [34]. Согласно этому, проволока в очаге деформации находится под действием сжимающих напряжений в касательном и радиальном направлении. При обжатиях менее 1 % пластически деформируется только поверхность проволоки, в то время как середина ее остается в упругом состоянии. После выхода из волюки происходит упругое восстановление центральных слоев проволоки. Но ввиду сплошности материала сердечник не может полностью упруго деформироваться, поэтому в нем возникают растягивающие остаточные напряжения, а в поверхности — сжимающие. При возрастании обжатий пластическая деформация распространяется с поверхности вглубь и охватывает все сечение проволоки. При условии одинаковой общей деформации поверхности и центральных слоев установлено, что упругая деформация растяжения в середине проволоки больше, чем на поверхности, поскольку обе зоны могут разрушаться независимо друг от друга. Сплошность материала мешает поверхностным и центральным слоям полностью упруго деформироваться при разгрузке позади волюки. Из-за этого в середине возникают сжимающие остаточные напряжения, а в поверхности — растягивающие.

Трение на граничной поверхности между инструментом и заготовкой накладывает дополнительные сдвиги в поверхностной зоне проволоки и этим изменяет остаточное напряженное состояние. Оно также приводит к повышению температуры материала, которое может привести при достаточно высоких скоростях волочения к возникновению дополнительных остаточных напряжений.

Смазка также влияет на остаточные напряжения. В то время как при волочении с использованием мыла и сурепного масла, а также и минерального масла наблюдается лишь незначительное различие

в величине поверхностных продольных остаточных напряжений, цилиндрическое масло приводит к значительному снижению остаточных напряжений на поверхности. При волочении на цилиндрическом масле сила волочения меньше, чем при использовании других смазок.

Цилиндрическое масло дает, очевидно, самые низкие остаточные поверхностные продольные напряжения. Однако, это положение справедливо только для скорости волочения порядка 31,5 м/мин. Поверхность проволоки с увеличением скорости волочения нагревается сильнее. Нагрев со своей стороны влияет на свойства смазки. При производственной скорости волочения порядка 200 м/мин может иметь место зависимость остаточных напряжений от смазки, противоречащая вышеуказанным выводам. Исследования Бюлера показали, что геометрия канала волокна оказывает влияние на возникающие остаточные напряжения [96]. Это влияние исследовалось в ряде опытов на стальной углеродистой проволоке, угол рабочего конуса изменялся в пределах от 6,3 ° до 25 °. С увеличением угла возрастает максимальное значение растягивающих остаточных напряжений на поверхности проволоки. Одновременно максимум смещается к уменьшенным обжатам; это положение подтверждено при анализе остаточного объемного состояния в волоченых прутках.

Влияние содержания углерода в стали на остаточные напряжения исследовалось до сих пор только при волочении прутков большого диаметра. Авторы в работе [34] провели исследования на стальных стержнях диаметром 48,5 мм. В этой работе было определено распределение остаточных напряжений по объему. Согласно этому исследованию поверхностные остаточные напряжения увеличиваются с повышением содержания углерода и, соответственно, с возрастанием прочности материала. Подобным же образом вели себя остаточные поверхностные продольные напряжения в волоченой проволоке, исследованные методом поперечного шлица.

Возможность уменьшения остаточных напряжений в процессе волочения дает метод повторного волочения, разработанный Бюлером [97]. Под этим подразумевают деформацию с незначительной степенью обжата, совмещенную с обычным процессом волочения. Для случая волочения стержней имеются многочисленные экспериментальные данные.

Необходимо было систематически исследовать при волочении проволоки воздействие различных условий повторного волочения

на остаточные напряжения. Во время опыта проводилась основная и последующая вытяжка за один рабочий ход, причем основная и вспомогательная волокни располагались соосно в одном проходе. При различных основных вытяжках во вспомогательном проходе изменялось обжатие, угол рабочего конуса и расстояние между волокнами. В отдельных опытах протягивались также различные материалы. Во второй по ходу волочения волоке осуществлялось очень незначительное обжатие, которое все же приводит к изменению поверхностных продольных остаточных напряжений. Наибольшее снижение остаточных напряжений происходит при обжатии 0,8 %. Максимум сжимающих остаточных напряжений возникает в основном проходе всегда при одном и том же обжатии. Этот вывод согласуется с результатами исследований, проведенных на прутках, а также на проволоке. Поверхностные остаточные напряжения при этом обжатии снижаются до 10...30 % своего первоначального значения.

При увеличении степени повторного обжатия остаточные напряжения вновь возрастают. Увеличение однако происходит с относительно незначительной интенсивностью. К этому следует добавить, что в диапазоне от 0,5 до 2 % обжатия в повторном проходе имеет место наибольшее снижение. В среднем оно составляет 80 % и зависит от угла вспомогательной волокни. Результаты измерения распределены неравномерно в полосе рассеивания. Разные степени повторного обжатия достигались расшлифовкой дополнительной волокни.

При определении остаточных напряжений в повторно протянутой проволоке из нелегированной стали с различным содержанием углерода установлены одинаковые функциональные связи между поверхностными продольными остаточными напряжениями и обжатием в главном проходе. Процентное уменьшение поверхностных продольных остаточных напряжений для всех исследованных в работе [97] материалов примерно одинаково.

Придается значение расстоянию между волокнами, так как слишком большое расстояние, несмотря на двукратное волочение, может служить причиной обрывов протягиваемого материала. Поверхность проволоки в волоке находится под действием сжимающих напряжений. С возрастанием расстояния от выхода из волокни меняется знак напряжения. В поверхности проволоки возникают большие растягивающие остаточные напряжения, которые могут приводить к обрывам. Опасность разрыва можно избежать установкой дополнительной

волоки на расстоянии от основной. Последующая деформация должна начинаться прежде, чем в поверхности проволоки возникнут растягивающие напряжения, как это возможно при слишком большом расстоянии между волокнами.

Во всех вышеописанных опытах повторного волочения расстояние между самыми узкими местами поперечного сечения каналов волок составляло 8 мм. Расстояние в свету равно нулю, причем нужно следить за качеством смазки в дополнительной волоке.

Можно сделать вывод, что последующая деформация в диапазоне сжимающих напряжений за основной волокой способствует дополнительному уменьшению остаточных напряжений. Было также проверено, влияет ли расстояние между волокнами на поверхностные продольные остаточные напряжения при волочении проволоки. Опыты не показали изменения остаточных напряжений при изменении расстояния между волокнами, как это было при волочении прутков.

Большая работа по изучению влияния маршрутов волочения, геометрии волок на величину и распределение остаточных напряжений в канатной проволоке из стали 60 проведена во ВНИИМетизе [5, 37]. Проволока протягивалась с диаметра 4,68 мм до 2,0 мм по четырем маршрутам в семь, шесть и пять проходов со средними деформациями за проход 14...34 %. Методом стравливания установлено, что на поверхности проволоки действуют растягивающие продольные напряжения 300...500 МПа при использовании волок с большими углами и 150...400 МПа — с меньшим углом рабочего конуса. В центре проволоки возникают остаточные сжимающие напряжения того же порядка. Факторы, способствующие увеличению неравномерности деформации (угол волоки, коэффициент трения), приводят и к возрастанию остаточных напряжений. При волочении в волокнах с малыми углами рабочего конуса уменьшение трения уменьшает остаточные напряжения.

Сравнение монолитных и роликовых волок показало, что применение роликовых волок значительно понижает остаточные напряжения: при обжати 32 % — в среднем на 20 %, а при деформации в два перехода с суммарным обжатием 57,5 % — на 45 %. Еще более эффективно применение холодной прокатки проволоки в четырехвалковых калибрах. Остаточные напряжения в проволоке меньше, чем после волочения в монолитных и роликовых волокнах. Применение смазки при прокатке и волочении снижает остаточные напряжения на 15–20 %, а увеличение обжатия с 15 до 32 % приводит к увеличению напряжения в два раза.



## 5.2. Остаточные напряжения в трубах

Также как и при волочении проволоки, остаточные напряжения в холоднодеформированных трубах возникают вследствие неоднородности деформаций и температуры в стенке трубы. Кроме обжатий и коэффициента трения на величину и распределение продольных и тангенциальных остаточных напряжений существенно влияет способ волочения из-за различия контактных условий трения.

Используя метод Н. Н. Давиденкова, авторы в работе [49] определяли остаточные тангенциальные и продольные напряжения при волочении труб без оправки, на короткой оправке и при многопроходном волочении без промежуточных отжигов.

Трубы размером  $45 \times 3$  мм из стали 10 протягивали без оправки с коэффициентами вытяжки в пределах  $1,07 \dots 1,86$  и на короткой оправке — с вытяжками  $1,10 \dots 1,80$  на цепном стане со скоростью 18 м/мин с использованием волок с углом рабочего конуса  $24^\circ$ . При послойном стравливании слоев с колец и полочек снимались слои  $0,25 \dots 0,30$  мм. Характер распределения тангенциальных и продольных напряжений для всех труб в основном одинаков и отличается только максимальными значениями напряжений. При безоправочном волочении на наружной поверхности во всех случаях наблюдались растягивающие напряжения, как продольные, так и тангенциальные. Распределения напряжений по стенке трубы близки к линейным.

На рис. 38 приведена зависимость максимальных тангенциальных и продольных остаточных напряжений на наружной поверхности от степени деформации при волочении без оправки. Каждая степень деформации достигалась волочением в один проход. Вначале с увеличением степени деформации напряжения растут, затем понижаются. Максимум для тангенциальных напряжений находится при 32 %, для продольных напряжений — при 15 % деформации по диаметру.

При многократном безоправочном волочении нет четкой зависимости напряжений от деформаций. Можно отметить только, что повышение остаточных напряжений от суммарных деформаций происходит плавно и те же самые значения напряжений достигаются при более высоких степенях деформаций.

После волочения на короткой оправке все остаточные напряжения меньше, чем при безоправочном волочении. С увеличением степени деформации по стенке при одной и той же деформации по ди-

аметру остаточные напряжения уменьшаются и даже меняют знак. Растягивающие напряжения на наружной поверхности труб переходят в сжимающие при  $(\Delta S/S_0) \cdot 100 \% \geq 30 \%$ , где  $\Delta S$  — абсолютное обжатие стенки,  $S_0$  — исходная толщина стенки трубы. Зависимость остаточных напряжений от степени редуцирования более сложная. В основном с увеличением обжатия по диаметру растут растягивающие остаточные напряжения и снижаются сжимающие.

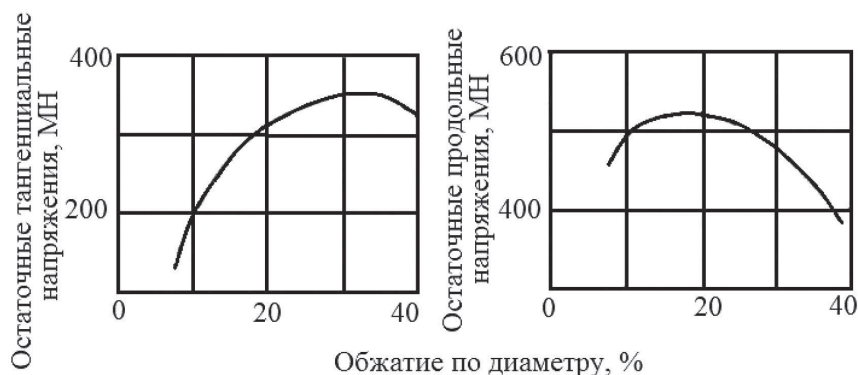


Рис. 38. Изменение тангенциальных и продольных напряжений на наружной поверхности труб после однократного волочения без оправки в зависимости от степени деформации

Достаточно обстоятельно вопросы влияния технологических параметров волочения на величину и распределение остаточных напряжений в стенке трубы рассмотрены в работе [5]. Установлено, что в случаях как однократного, так и многократного безоправочного волочения труб на их наружной поверхности всегда возникают растягивающие продольные и тангенциальные остаточные напряжения, а на внутренней — сжимающие. Поэтому качество труб, например, их коррозионную стойкость, можно характеризовать максимальными напряжениями на наружной поверхности. Зависимость этих напряжений от степени деформации показана на рис. 39 [5].

При однократном волочении без оправки тангенциальные напряжения максимальны при обжатии 30 %, а продольные — при 15 %. Увеличение продольных напряжений в случае многократного волочения по сравнению с продольными напряжениями после однократного волочения при обжатии более 25 % свидетельствует об увеличении кривизны труб. Схема многократного безоправочного волочения широко



применяется в сочетании с ужесточенными маршрутами производства холоднодеформированных стальных труб. С увеличением сопротивления деформации металла увеличиваются и остаточные напряжения при сохранении характера их распределения по толщине стенки.

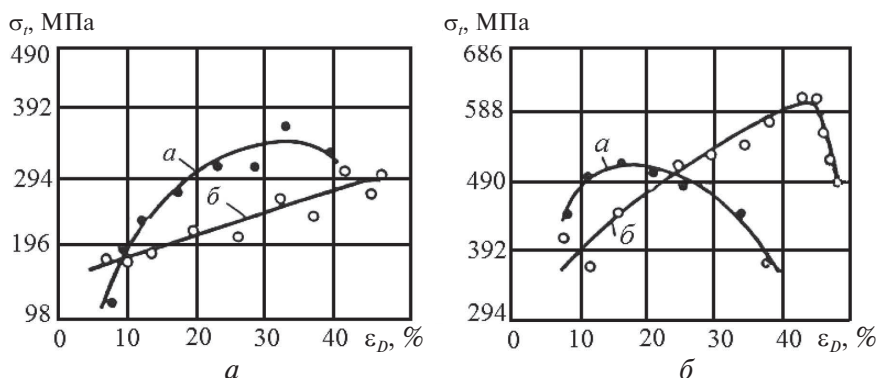


Рис. 39. Зависимость максимальных остаточных напряжений на наружной поверхности труб от обжатия по диаметру при однократном —  $a$  и многократном —  $b$  безоправочном волочении

Маршруты изготовления опытных партий труб короткооправочным волочением были построены авторами в работе [5] с учетом возможности изменения обжатий по толщине стенки в пределах 8...32 % при постоянном обжатии по диаметру, а также изменения обжатия по диаметру в пределах 6,5...20 % при постоянных обжатиях по стенке. Трубы были протянуты со скоростью 0,47 м/с через волокна с углом  $24^\circ$ . После проведения опытного волочения установлена однородность распределения остаточных напряжений по длине труб. Трубы были изготовлены из сталей 20 и 30ХГСА. Использовались хромированные цилиндрические оправки из инструментальной стали. Перед волочением трубы подвергались фосфатированию и омыливанию.

На рис. 40 показано распределение остаточных окружных напряжений по толщине стенки. Отмечено, что характер распределения продольных остаточных напряжений подобен тангенциальным. По величине продольные напряжения при оправочном волочении выше, чем окружные.

Важным результатом этих опытов является установление возможности изменения знака остаточных напряжений на наружной поверхности труб. В частности, при обжатиях на стенке  $\varepsilon_s > 20\%$  и по диаметру

$\varepsilon_D > 15\%$  возможно получить трубы со сжимающими как тангенциальными, так и продольными напряжениями на обеих поверхностях. Показано также, что увеличение угла конусности волоки при волочении труб на короткой оправке и без оправки приводит к повышению остаточных напряжений. Форма применяемых оправок оказывает влияние не только на величину, но и на характер распределения остаточных напряжений. Применение эллиптических оправок вместо цилиндрических для короткооправочного волочения труб приводит к возникновению на их поверхности сжимающих остаточных тангенциальных напряжений.

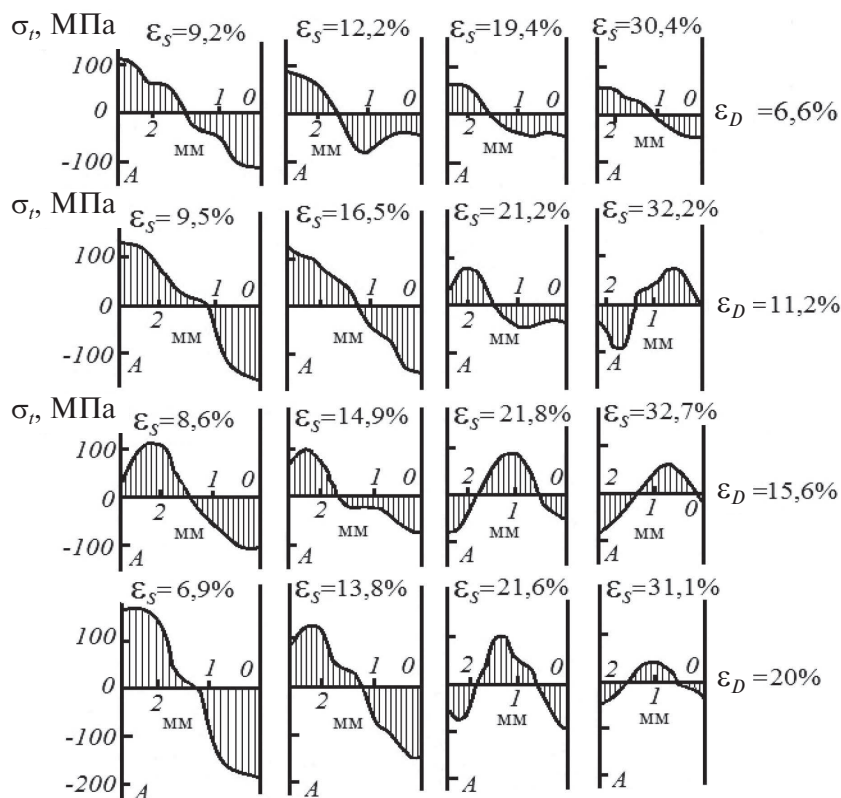


Рис. 40. Распределение остаточных тангенциальных напряжений  $\sigma_t$  по толщине стенки труб после волочения на короткой оправке (А — наружная поверхность)

При волочении труб на длинной подвижной оправке остаточные напряжения распределяются по сечению стенки как при безоправоч-

ном волочении. При этом продольные напряжения существенно превышают тангенциальные. Следует учитывать, что высокие тангенциальные растягивающие напряжения на поверхности трубы вызывают сильное схватывание трубы и оправки с увеличением усилия, необходимого для извлечения оправки. Это связано с тем, что внешние слои трубы стремятся уменьшить свой параметр и плотно охватывают оправку, а из-за препятствия внутренних слоев и возникают высокие растягивающие напряжения. Чем выше уровень растягивающих тангенциальных остаточных напряжений, тем, очевидно, больше будет усилие извлечения оправки различными технологическими приемами.

Применение сдвоенных волок и изменение углов конусности волок дает возможность уменьшить растягивающие остаточные напряжения и, следовательно, значительно снизить усилие извлечения оправок [98].

## 6. Технологические приемы, направленные на снижение уровня и перераспределение остаточных напряжений в проволоке и трубах

---

**П**оскольку остаточные напряжения в металлоизделиях могут пагубно сказываться на эксплуатационных свойствах, проблема их снижения или перераспределения в объеме всегда остается актуальной и вынуждает технологов либо изменять режимы пластической и термической обработок, либо вводить дополнительные операции обработки готовых изделий.

В первую очередь при прогнозировании конечных свойств металлопродукции следует учитывать явления релаксации остаточных напряжений в результате процессов ползучести в объеме напряженного металла. Из-за постепенного перераспределения остаточных напряжений при их релаксации происходит самопроизвольное изменение размеров и коробление металлоизделий при их хранении и даже при эксплуатации, если предварительно не приняты меры по существенному снижению или благоприятному перераспределению этих напряжений. Скорость релаксации (уменьшения) напряжений зависит от их исходного уровня и схемы напряженного состояния. Чем они выше, тем быстрее проходит релаксация. Так как в разных участках объема изделия величина остаточных напряжений различна, то из-за неодинаковой скорости их релаксации даже при комнатной температуре нарушается исходное равновесие внутренних сил и моментов, в результате чего устанавливается новое состояние равновесия. Неоднородность исходного напряженного состояния порождает при релаксации напряжений коробление изделий, величина которого тем больше, чем выше неоднородность остаточных напряжений в объеме.

К эффективным технологическим приемам, снимающим и перераспределяющим остаточные напряжения, относятся следующие:

- термическая обработка;
- термомеханическая обработка и все варианты пластической деформации с регламентированным принудительным или деформационным нагревом металлических изделий;
- механическое объемное и поверхностное воздействие на пластически или термически обработанные изделия;
- рациональный выбор технологических параметров обработки металлов давлением.

### 6.1. Термические методы снижения остаточных напряжений

---

Влияние термической обработки, в частности отжига, на уровень остаточных напряжений в холоднодеформированных изделиях подробно описано в работе [18], где под отжигом, уменьшающим остаточные напряжения, понимается термическая обработка, при которой главным процессом является полная или частичная релаксация остаточных напряжений.

Остаточные напряжения при отжиге и отпуске уменьшаются двумя путями: вследствие пластической деформации в условиях, когда эти напряжения превышают сопротивление металла деформации, или в результате ползучести при напряжениях меньше предела текучести.

Остаточные напряжения всегда упругие, пропорциональны модулю упругости и величине упругой деформации. При нагреве модуль упругости и, следовательно, остаточные напряжения изменяются незначительно до тех пор, пока напряжения не достигнут уровня сопротивления деформации, которое снижается с ростом температуры. Выше некоторой температуры предел текучести становится ниже остаточных напряжений, развивается пластическая деформация, в результате которой остаточные напряжения уменьшаются до значения предела текучести. До каких пределов могут при нагреве снизиться остаточные напряжения в реальных деформированных твердых телах определить достаточно сложно из-за существенной неоднородности деформированного состояния и, следовательно, поля остаточных напряжений. Автор работы [18] считает, что степень разгрузки тела по остаточным напряжениям определяется температурой отжига (отпуска), а не его продолжительностью.

В изделиях, в которых остаточные напряжения меньше предела текучести, упругая деформация также может с течением времени переходить в пластическую деформацию. В этом случае ползучесть является единственным возможным механизмом их уменьшения. Медленное пластическое течение осуществляется перемещением ограниченного числа легкоподвижных дислокаций. Их исчерпание на дислокационных барьерах приводит к затуханию ползучести, а уменьшение остаточных напряжений еще более усиливает это затухание. С увеличением продолжительности термической обработки в скольжение вовлекаются менее благоприятно расположенные дислокации.

Таким образом, если нагревать изделие до температуры, при которой предел текучести становится меньше остаточных напряжений, то вначале происходит быстрая разрядка напряжений до предела текучести вследствие массового размножения и скольжения дислокаций, а затем этот механизм пластической деформации сменяется ползучестью, приводящей к постепенной и затухающей во времени релаксации напряжений.

Быстрая разгрузка тела по остаточным напряжениям при повышенных температурах может представлять опасность, поскольку из-за неоднородности напряженного состояния в объеме разгрузка часто приводит к нарушению равновесия внутренних сил и моментов, сопровождающемуся короблением. Рационально проводить отжиг (отпуск) таким образом, когда медленная пластическая деформация нарастает при одновременном и равном уменьшении упругой деформации. При этом линейные размеры в направлении действия сил не изменяются. Чем выше уровень исходных напряжений, тем быстрее в первый период происходит их разрядка и тем больше опасность коробления.

Что касается продолжительности термической обработки, то следует отметить, что определенной температуре в каждом конкретном изделии соответствует свой конечный уровень остаточных напряжений, по достижению которого увеличивать продолжительность отжига (отпуска) практически бесполезно [18].

На практике уменьшение уровня и перераспределения остаточных напряжений является побочным явлением, сопровождающим разнообразные операции термообработки. Снятие остаточных напряжений проходит одновременно с основными структурными и фазовыми изменениями. Например, при высоком отпуске стали, наряду с основным процессом превращения мартенсита в сорбит, уменьшаются за-

калочные напряжения. Остаточные напряжения, возникающие при холодной и теплой деформации, уменьшаются при рекристаллизационном отжиге, основной целью которого является снятие наклепа.

Использование отжига для уменьшения напряжений лимитируется теми нежелательными структурными и фазовыми изменениями, которые могут произойти при нагреве. Например, чтобы достаточно полно снять закалочные напряжения в изделиях из термически упрочняемых алюминиевых сплавов, необходимо нагревать их до температур около 230...260 °С. Но при таких температурах в алюминиевых сплавах происходит перестаривание, сопровождающееся снижением прочности. Для полного снятия остаточных макронапряжений после холодной обработки давлением желательно проводить отжиг при таких температурах, при которых протекает рекристаллизация. Но при этом снимается упрочнение от холодной обработки давлением, что во многих случаях недопустимо. Поэтому приходится либо мириться с недостаточно полным снятием остаточных напряжений при низких температурах, либо идти на компромисс, достигая более полного снятия напряжений при некотором ухудшении механических и других свойств.

Скорости нагрева и особенно охлаждения при отжиге должны быть небольшими, чтобы не возникли новые внутренние термические напряжения.

Отжиг для уменьшения остаточных напряжений широко применяют в технике. Он уменьшает вредные остаточные растягивающие напряжения, особенно опасные при объемном напряженном состоянии, позволяет повысить допустимые внешние нагрузки, повышает сопротивляемость усталости и ударным нагрузкам, снижает склонность к хрупкому разрушению, межкристаллитной коррозии и коррозионную усталость, стабилизирует размеры и предотвращает коробление изделий.

О применении термической обработки для снижения уровня остаточных напряжений говорится в работе [5]. По мнению авторов, для большинства металлов и сплавов остаточные напряжения снимаются при температурах нагрева до 600 °С. Однако полное снятие остаточных напряжений происходит только при температурах рекристаллизации. Режимы термической обработки широко варьируют в зависимости от марки сплава и желаемого результата. Применяют отжиг, нормализацию, закалку с отпуском, либо закалку и нормализацию с последующим отпуском, либо отжиг по сложному температурному режиму.



При выборе режимов термической обработки, с целью снижения или перераспределения остаточных напряжений, следует учитывать, что любые способы охлаждения при термообработке характеризуются новой схемой распределения напряжений, отличной от исходной, после завершения холодной или теплой пластической обработки. Новое распределение остаточных напряжений может благоприятно сказываться на эксплуатационных свойствах металлоизделий. Однако может быть и обратный эффект, что связано с общим разупрочнением металла или со сменой знака остаточных напряжений на поверхности изделия даже при снижении их уровня. Автор книги [7] отмечает важную особенность в образовании остаточных напряжений после интенсивного нагрева. В процессе нагрева создаются температурные напряжения сжатия, превосходящие предел текучести материала. В результате в материале образуется остаточная пластическая деформация сжатия. После охлаждения (тепловой разгрузки) размеры тела возвращаются к прежним, но наличие остаточной деформации сжатия вызывает появление растягивающих остаточных напряжений. Во многих случаях оказывается необходимым учесть специфические объемные изменения в материале, связанные с фазовыми и структурными превращениями, которые определяются не только температурой, но и другими параметрами процесса, например, временем.

При расчете реальных процессов нагрева и охлаждения следует также иметь в виду, что распределение температуры и температурных напряжений сильно изменяется во времени [7].

В некоторых случаях технологический процесс включает специальную термическую обработку для создания благоприятных остаточных напряжений. Как правило, она заключается в нагреве до невысокой температуры (300...600 °С) с последующим быстрым охлаждением. В процессе охлаждения в поверхностных слоях возникает пластическая деформация растяжения и после выравнивания температурного поля появляются остаточные напряжения сжатия. Сжимающие поверхностные остаточные напряжения возникают при закалке токами высокой частоты.

Влияние режимов охлаждения стальной проволоки после теплового волочения на величину остаточных напряжений изучалось теоретически решением задач термоупругопластичности [53]. Были проведены вычисления для случая волочения из стали 80 диаметром 5 мм с начальной температурой 320 °С. Исследовалось влияние на уровень



остаточных напряжений принудительного охлаждения перед смоткой проволоки. Проведено сопоставление распределений остаточных напряжений в проволоке, произведенной по технологии Белорецкого металлургического комбината, с новым технологическим вариантом, содержащим ускоренное охлаждение при коэффициенте теплопередачи  $23 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  в течение времени  $0,025 \text{ с}$ . Принудительное охлаждение позволило снизить продольные и тангенциальные остаточные напряжения на поверхности проволоки с 1360 до 1220 МПа и с 1230 до 1020 МПа соответственно. Снижение незначительно и составляет величину порядка  $10 \dots 20 \%$ . В основном это связано с низкой температурой проволоки и поэтому высоким пределом упругости, что затрудняет осуществление требуемого пластического деформирования, а также с малой длиной участка охлаждения. В связи с этим был рассчитан вариант с предварительным подогревом до  $600^\circ \text{С}$  перед принудительным охлаждением. Считалось, что проволока разогревается индуктором перед участком равномерного по сечению охлаждения. Применение предварительного подогрева позволяет снизить продольные остаточные напряжения на поверхности проволоки до 730 МПа, а тангенциальные — до 620 МПа, т. е. снижение напряжений составляет  $40 \dots 50 \%$ .

Влияние отпуска патентированной углеродистой проволоки на величину и распределение остаточных напряжений подробно рассмотрено в работе [53]. Изучалось влияние не только температуры отпуска, но и величины частных и суммарных обжатию при волочении, а также режимов патентирования. Установлено, что частные обжатия наиболее существенно влияют на характер распределения осевых напряжений и их абсолютную величину. Остаточные напряжения в проволоке определялись методом послойного стравливания и рассчитывались по формуле Хейна. При сравнительно малых частных обжатиях (около 0,15) на поверхности проволоки возникают растягивающие напряжения, больше чем при средних обжатиях (около 0,20). Однако при сравнительных обжатиях более 0,30 на поверхности возникают сжимающие напряжения и характер распределения напряжений по сечению принципиально меняется. Это наблюдалось при волочении проволоки из сталей У9 А, 45 и 10.

На величину осевых напряжений оказывает влияние температура ванны для изотермической выдержки при патентировании. При понижении температуры ванны, приводящей к росту прочности патен-

тированной и холоднотянутой проволоки, возникают более высокие осевые напряжения.

Обнаруженное anomальное изменение распределения остаточных напряжений с ростом единичных обжатий при волочении авторы [53] объясняют следующим образом. Малые обжатия приводят к повышению неоднородности деформации по сечению, к сдерживанию течения металла вблизи поверхности соприкосновения с волокой, что обуславливает повышение растягивающих остаточных напряжений в поверхностных слоях проволоки. С повышением обжатий деформация по сечению распределяется более равномерно и уровень остаточных напряжений снижается. При больших обжатиях металл преимущественно деформируется в центральных зонах сечения проволоки. В осевой зоне после волочения сохраняются растягивающие остаточные напряжения, а в периферийных слоях и сжимающие напряжения.

В большинстве случаев патентованная стальная проволока подвергается отпуску. Уже в процессе волочения за счет теплоты пластической деформации и контактного трения может происходить частичный отпуск проволоки, температура и продолжительность которого зависит от условий волочения и охлаждения. Но чаще всего отпуск проводят в проходных печах. Влияние температуры отпуска на величину остаточных напряжений изучалось на проволоке диаметром 3 и 0,5 мм из сталей марок У8 А, 45 и 10 в диапазоне температур 100...600 °С.

В качестве примера на рис. 41 приведены результаты исследований влияния температуры отпуска на величину и распределение остаточных напряжений, полученные авторами в работе [53].

На основании полученных экспериментальных данных авторы делают вывод, что температурой полной релаксации напряжений при выдержке 1 час можно считать температуру, равную 500 °С. Характер распределения осевых остаточных напряжений по сечению проволоки сохраняется после отпуска при всех исследованных температурах. Авторы в работе [53] отмечают, что в проведенных опытах скорость релаксации остаточных напряжений достаточно высока. Уже после выдержки 15...20 с релаксация напряжений почти прекращается. Время достижения одного и того же уровня осевых остаточных напряжений для температур от 200 до 500 °С различно, что иллюстрируется рис. 42.

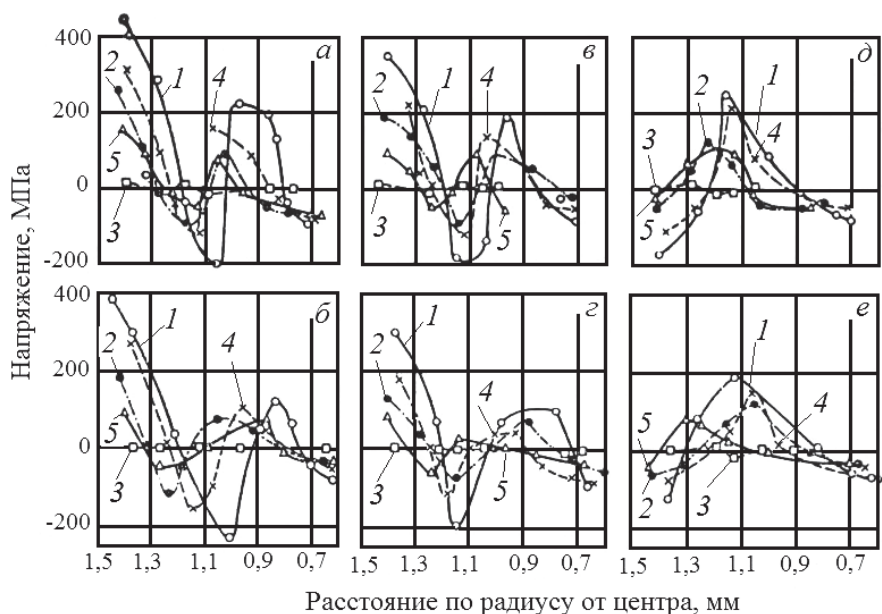


Рис. 41. Распределение осевых напряжений в проволоке из стали 45 диаметром 3,0 мм в зависимости от температуры отпуска: а — частные обжаты  $\varepsilon = 15\%$ , температура свинцовой ванны  $440\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; б —  $\varepsilon = 15\%$ ,  $t = 470\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; в —  $\varepsilon = 25\%$ ,  $t = 440\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; г —  $\varepsilon = 25\%$ ,  $t = 470\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; д —  $\varepsilon = 33\%$ ,  $t = 440\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; е —  $\varepsilon = 33\%$ ,  $t = 470\text{ }^{\circ}\text{C}$  (нормализация); 1 — холоднотянутая проволока; 2 — проволока, отпущенная при  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 3 — то же, при  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 4 — то же, при  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 5 — то же, при  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$

С целью изменения характера распределения остаточных напряжений в объеме, а главное на поверхности металлоизделий, в частности из титановых сплавов, предлагается [99] использовать и усовершенствовать технологию термопластической обработки. Многочисленными исследованиями установлено, что в результате применения методов упрочняющей обработки на основе поверхностного пластического деформирования (ППД) в поверхностном слое возникают благоприятные остаточные напряжения сжатия при соответствующей степени деформационного упрочнения.

В связи с тем, что при традиционных методах ППД в поверхностных слоях металлоизделий степень деформационного упрочнения достигает значительных величин, в условиях повышенных и высоких температур интенсифицируются диффузионные процессы. Поэтому использование ППД для деталей, работающих при повышенных тем-

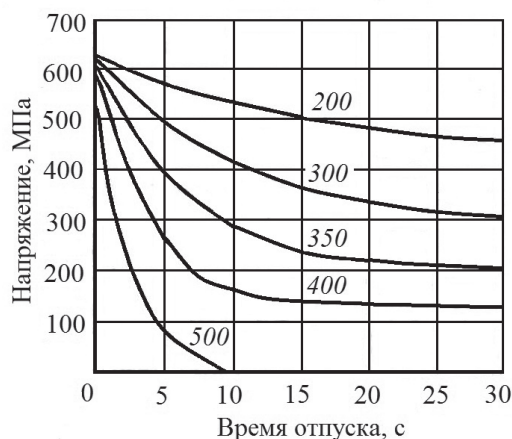


Рис. 42. Изменение величины осевых напряжений в проволоке диаметром 0,5 мм из стали У8 А в зависимости от времени выдержки при отпуске (на кривых указана температура отпуска, °C)

пературах, имеет свои ограничения. В этом плане наиболее оптимальными для них являются методы упрочнения, которые обеспечивают в поверхностном слое изделия благоприятное напряженное состояние при минимальной степени упрочнения. Одним из таких методов является термомпластическое упрочнение (ТПУ). Процесс ТПУ состоит из двух основных этапов: сквозного прогрева детали до температуры начала термомпластической деформации и ускоренного спрейерного охлаждения водой. Время между окончанием нагрева и началом

охлаждения должно быть минимальным. В начальный период охлаждения наружные слои изделия стремятся сократить свой размер, внутренние же слои, имеющие значительно более высокую температуру, препятствуют этому. В результате поверхностные слои подвергаются растяжению, а центральные — сжатию. Если в этот момент возникающие упругие напряжения сжатия выше предела текучести материала для данной температуры, то произойдет пластическая деформация. В дальнейшем интенсивность охлаждения наружных слоев уменьшается и постепенно их температура приближается к температуре окружающей среды. При дальнейшем охлаждении наружные слои практически не деформируются, а сердцевина будет стремиться существенно сократить свой объем. Поэтому в момент окончания процесса охлаждения сердцевина будет сжимать наружные слои, которые в свою очередь будут растягивать сердцевину. В связи с этим в поверхностном слое упрочненного изделия образуются сжимающие остаточные напряжения.

На рис. 43 представлены результаты исследований зависимости остаточных напряжений от температуры нагрева, выполненных авторами в работе [99]. В поверхностном слое образцов из сплавов ВТ9 и ВТ20 образовались благоприятные остаточные напряжения сжа-

тия с максимумом на поверхности. Наличие максимальных остаточных напряжений сжатия на поверхности изделия играет весьма положительную роль, так как в процессе эксплуатации тонкие поверхностные слои испытывают наибольшие напряжения независимо от характера нагрузок. Кроме того, эти слои сильно ослаблены рисками, вырывами, структурными концентраторами и неоднородной шероховатостью, что приводит к появлению усталостных трещин и к развитию межкристаллитной коррозии.

По сравнению с упрочняющими методами, основанными на механическом поверхностном пластическом деформировании, метод ТПУ имеет важную особенность: он практически не вызывает дополнительного увеличения степени упрочнения поверхностного слоя и позволяет получать более благоприятные сжимающие напряжения на большой глубине. Расположение максимума остаточных напряжений на поверхности является одним из преимуществ ТПУ перед механическими видами упрочняющих технологий, при которых максимальные напряжения сжатия находятся в поверхностном слое, а непосредственно на поверхности наблюдается спад напряжений.

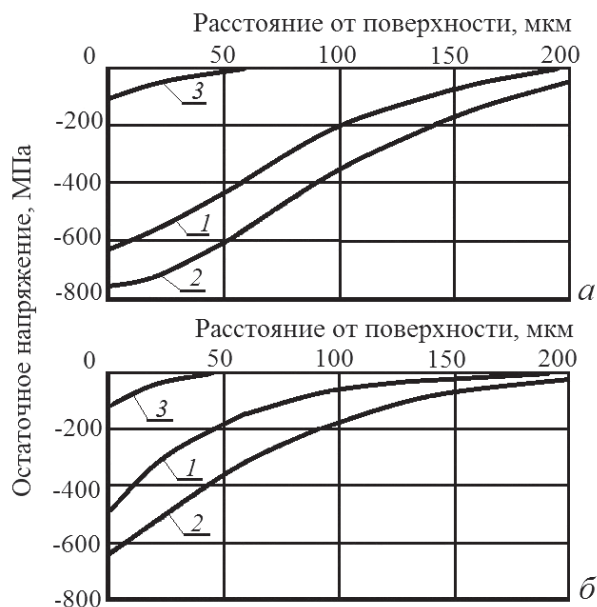


Рис. 43. Остаточные напряжения в поверхностном слое образцов из сплава ВТ9 — а и ВТ20 — б. Режимы упрочнения: 1, 2 —  $p = 600$  кПа при температуре соответственно 800 и 850 °С; 3 — без упрочнения

Аналогичная технология применительно к термической обработке труб (пример насосно-компрессорных по ГОСТ 633–80) предлагается в материалах патента [100]. При термической обработке нагрев труб осуществляется токами высокой плотности (до  $15 \text{ А/мм}^2$ ) и охлаждение ее поверхностей охлаждающим агентом. Нагрев стальных труб выполняется до температуры, не превышающей  $A_{C1}$ , после этого делается выдержка при этой температуре в течение не более 20 минут, а затем осуществляется охлаждение со скоростью  $75\ldots 100 \text{ }^\circ\text{C/с}$ . Для создания регламентированных остаточных напряжений сжатия на внешней поверхности трубы осуществляется охлаждение внутренней поверхности. Для создания таких напряжений на внутренней поверхности охлаждению подвергается наружная поверхность. Подобный режим термической обработки позволяет достичь необходимых температурных перепадов и соответствующих пластических деформаций в макрообъемах по толщине стенок трубы.

При этом, поскольку максимальная температура нагрева не превышает температуру предшествующего отпуска, то обеспечивается сохранение основных механических свойств. Увеличение плотности тока выше  $15 \text{ А/мм}^2$  нецелесообразно с точки зрения энергозатрат при термообработке труб нефтяного сортамента, имеющих фиксированные длину и площадь сечения. Увеличение времени выдержки свыше 20 минут не приводит к существенному возрастанию сжимающих напряжений, но увеличивает энергозатраты. При осуществлении охлаждения со скоростью менее  $75 \text{ }^\circ\text{C/с}$  уровень остаточных напряжений изменяется недостаточно и не дает существенного улучшения эксплуатационных свойств труб. Увеличение скорости охлаждения выше  $100 \text{ }^\circ\text{C/с}$  не приводит к значительному увеличению уровня остаточных сжимающих напряжений, но может привести к короблению и разрушению труб.

Предлагаемый способ может быть проиллюстрирован следующим примером. Насосно-компрессорную трубу (ГОСТ 633–80) диаметром 73 мм, толщиной стенки 5,5 мм, длиной 10000 мм из стали марки 23 Г2 А нагревали путем пропускания электрического тока плотностью  $15 \text{ А/мм}^2$ . Нагрев трубы контролировали пирометром. Охлаждение водой осуществляли через перфорированную штангу, вставленную внутрь трубы по всей длине. Контроль остаточных напряжений проводили с помощью ИВК «Ситон», который позволяет электроконтактным неразрушающим методом осуществлять измерение остаточ-



ных напряжений в поверхностном слое изделий из токопроводящих металлов и сплавов. Результаты проведенных экспериментов представлены в табл. 7. При этом, поскольку максимальная температура нагрева не превышала температуру предшествующего отпуска, обеспечивалось сохранение основных механических характеристик изделий:  $\delta$  до обработки составляло 13,51 %, после обработки — 14,1 %;  $\sigma_{0,2}$  до обработки — 726 МПа, после обработки — 732 МПа;  $\sigma_B$  до обработки — 828 МПа, после обработки — 835 МПа. Полученные результаты (см. табл. 6) также подтверждают, что охлаждение со скоростью ниже 75 °С/с (варианты 1,2) снижает уровень остаточных напряжений, однако величина изменения напряжений недостаточна для существенного изменения эксплуатационных свойств труб. Увеличение скорости охлаждения внутренней поверхности до 75...100 °С/с позволило получить снижение напряжений на внешней поверхности на 150...200 МПа без существенного изменения напряжений на внутренней поверхности. Таким образом, при использовании предложенных режимов термообработки труб возникают возможности управления остаточными напряжениями на одной из поверхностей трубы и создания необходимого уровня остаточных сжимающих напряжений и их оптимального распределения по сечению трубы, отвечающих условиям ее эксплуатации.

Таблица 7

**Остаточные напряжения в стенках труб после термической обработки**

№	Температура нагрева, °С	Время выдержки, мин	Скорость охлаждения, °С/с	Остаточные напряжения, МПа			
				Наружная поверхность		Внутренняя поверхность	
				До обработки	После обработки	До обработки	После обработки
1	500	5	10 (воздух)	–180	–235	175	230
2	600	5	10 (воздух)	–170	–250	160	18
3	550–600	5	75 (вода внутрь)	–170	–280	65	50
4	550–600	5	75 (вода внутрь)	–170	–320	65	95
5	550–600	5	100 (вода внутрь)	–170	–370	65	120
6	550–600	5	100 (вода внутрь)	–170	–320	65	240
7	600	7	85 (вода)	–60	–365	—	—
8	600	20	85 (вода)	–60	–395	—	—

В плане совершенствования технологии термической обработки труб из углеродистых сталей представляет интерес запатентованный способ повышения стойкости труб против коррозионно-механического разрушения путем нагрева электроконтактным способом и охлаждения обеих поверхностей трубы, причем нагрев осуществляется одновременно с охлаждением ее поверхностей [101, 105–109].

В качестве примера авторы в работе [101] рассмотрели процесс термообработки стальных насосно-компрессорных труб. Трубу, предназначенную для снижения на ее поверхностях остаточных растягивающих напряжений и формирования сжимающих, оснащают на торцах токосъемниками, через которые пропускают ток для нагрева трубы. Охлаждение поверхностей стенок трубы может осуществляться одновременно с нагревом естественной конвекцией окружающей среды или принудительной (искусственной) конвекцией жидкого или газообразного охлаждающего агента. Таким образом, осуществляется нагрев трубы и одновременное охлаждение со стороны поверхностей.

Труба разогревается из внутреннего объема стенок в направлениях к внутренней и наружной поверхностям. При этом возникающие температурные поля по толщине стенки трубы характеризуются более высокой температурой внутренних объемов (не имеющих возможности конвективного теплообмена с окружающей средой) по сравнению с приповерхностными объемами. Различие в температурах по толщине стенок приводит к различным продольным и тангенциальным температурным удлинениям в объемах по толщине стенок трубы.

Это обстоятельство и является причиной возникновения различных по знаку и величине напряжений, вызывающих деформации в микрообъемах. Для сохранения неизменными основных прочностных характеристик (предел прочности и предел текучести) максимальная температура нагрева трубы не должна вызывать изменений в кристаллической решетке стали, т. е. не должна превышать максимально возможной температуры высокого отпуска для материала конкретных труб.

Другими обстоятельствами, оказывающими влияние на величину и знаки остаточных напряжений, являются интенсивность нагрева джоулевым теплом и интенсивность охлаждения. После охлаждения труб, т. е. после выравнивания температур по толщине стенок, произошедшие во время нагрева с одновременным охлаждением поверхностей остаточные деформации в микрообъемах вызовут снижение величины остаточных растягивающих и появление остаточных сжи-



мающих напряжений со стороны поверхностей стенок труб. При этом во внутренних объемах по толщине стенок труб для уравнивания приповерхностных сжимающих напряжений появятся остаточные напряжения растяжения.

Формирование благоприятного распределения остаточных напряжений в стенке трубы термической обработкой описано в работе [104]. Рассматривается метод термической обработки трубы, при котором охлаждающая вода прокачивается через трубу при нагреве наружной поверхности трубы индукционным или электроконтактным способом с целью создания разности температур между наружной и внутренней поверхностями таким образом, чтобы внутренняя поверхность трубы могла быть пластичной при растяжении или наружная поверхность могла быть пластичной при сжатии, создавая таким образом остаточные сжимающие напряжения и остаточные растягивающие напряжения на внутренней и наружной поверхностях трубы соответственно. В патенте [104] дается следующее объяснение результата.

Однако в этих традиционных методах термической обработки на внутренней поверхности трубы сохраняется остаточное растягивающее напряжение, связанное с разницей в скорости охлаждения на наружной и внутренней поверхностях трубы во время обработки.

В частности, в случае с трубой из нержавеющей стали термообработка проводилась таким образом, что вначале осуществлялся нагрев целой трубы до высокой температуры, а затем она погружалась в резервуар, наполненный охлаждающей водой. Тем не менее, поскольку внутренняя поверхность трубы не остывает до тех пор, пока в нее не попадет через концы охлаждающая вода, то начало охлаждения внутренней поверхности трубы идет после охлаждения наружной поверхности трубы, которое начинается сразу после того, как она погружается и вступает в прямой контакт с охлаждающей водой. Кроме того, внутренняя поверхность трубы не может контактировать с достаточно холодной водой для охлаждения, при этом на наружной поверхности трубы повышение температуры охлаждающей воды происходит не так быстро, поэтому на внутренней поверхности скорость охлаждения медленней по сравнению с наружной поверхностью, что вызывает, тем самым, возникновение остаточного растягивающего напряжения на внутренней поверхности трубы. Помимо этого, ввиду того, что на практике существует ограничение по размеру трубы, только основная часть трубы может быть охлаждена в достаточной степени.

Создание остаточного сжимающего напряжения на внутренней поверхности трубы возможно не только для вышеописанного типа нержавеющей стали 304, но также и для других материалов, таких как низколегированная сталь, в том числе хром-молибденовая сталь, высоколегированная сталь, в том числе хром-никелевая высокопрочная сталь, углеродистая сталь или медь, чтобы улучшить стойкость трубы, произведенной из этих материалов, к коррозионной усталости. Данный метод основан, главным образом, на разнице температур между наружной и внутренней поверхностью трубы, которая является достаточно значительной для создания напряжения, превышающего предел текучести при сжатии на наружной поверхности трубы. Следовательно, не всегда требуется, чтобы охлаждающая среда циркулировала, она может находиться в трубе в ходе нагрева наружной поверхности. Однако, подобный метод не может применяться для обработки тонкостенных труб, поскольку чрезвычайно сложно добиться достаточно большой разницы температур между наружной и внутренней поверхностью трубы. Таким образом, в отличие от методики с циркулирующей охлаждающей средой, обработка с внутренней нециркулирующей жидкостью эффективна только в применении для тех труб, которые сделаны из материала с плохой теплопроводностью или труб с толстыми стенками.

К специфическим видам термической обработки металлоизделий, используемым для снижения уровня остаточных напряжений, относятся способы термоциклирования и термоударов [2].

Термоциклирование наиболее целесообразно использовать для обработки многофазных сплавов, когда фазы существенно различаются коэффициентами линейного расширения (силумины,  $\alpha+\beta$ -сплавы титана, двухфазные латуни и др.). Его целесообразно применять к изделиям, к которым предъявляются особо жесткие требования по стабильности размеров. Например, детали из силуминов типа АЛ2 и АЛ9 охлаждают до температур  $-40...-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ , затем нагревают до комнатной температуры, а потом нагревают до  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Затем детали охлаждают и вновь обрабатывают холодом. В течение нескольких циклов такой обработки (последней операцией является нагрев) остаточные напряжения уменьшаются на  $30...70\%$ . Обычный даже длительный отпуск при  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  несравненно слабее уменьшает остаточные напряжения. Из-за большой разницы в термических коэффициентах линейного расширения алюминиевой и кремниевой фаз на межфаз-

ных границах возникают микронапряжения. При обработке холодом эти напряжения усиливаются и, складываясь с остаточными напряжениями, вызывают при нагреве значительные пластические деформации. Таким образом, чередование захлаживания до отрицательных температур и последующего нагрева усиливает пластическое течение в микроучастках и этим способствует более полному уменьшению остаточных напряжений.

Метод термоударов состоит в создании при быстром нагреве изделия термических напряжений, которые способствуют релаксации остаточных напряжений. Например, чтобы снизить закалочные напряжения в плитах, штамповках и других деталях из алюминиевых сплавов, которые нельзя отжигать из-за недопустимости разупрочнения, предлагается применять обработку холодом с последующим термоударом. Закаленное изделие помещают в жидкий азот ( $-196^{\circ}\text{C}$ ), а затем быстро нагревают до невысоких температур в кипящей воде или струе пара. Предварительное захлаживание в жидком азоте позволяет увеличить термические напряжения во время термоудара при невысокой температуре нагрева.

## 6.2. Механические методы снижения остаточных напряжений

---

Как уже отмечалось, разгрузка изделий по остаточным напряжениям при термической обработке любого вида происходит в результате развития локальных пластических деформаций. Если остаточные напряжения значительно меньше предела текучести, то они релаксируют достаточно медленно за счет ползучести. Во многих случаях для более полного и быстрого уменьшения остаточных напряжений используют различные временные нагрузки изделия, которые, суммируясь с остаточными напряжениями, вызывают пластическую деформацию во всем изделии или в отдельных его участках. К самым старым способам создания временных перегрузок относится принудительная вибрация и остукивание со всех сторон чугунных отливок. Эти простые приемы весьма эффективно предотвращают коробление. Для стабилизации размеров чугунных отливок можно применять также временное статическое нагружение. Так, для правки профилей из алюминиевых сплавов используют растяжение на 1...3 % на правильно-растяжных

машинах. При этом частично снижаются остаточные напряжения, возникшие после прессования или закалки [2].

В отличие от внешних постоянных напряжений остаточные напряжения могут снижаться и перераспределяться по объему твердого тела под воздействием циклических нагрузок. При циклическом (в частности, знакопеременном) нагружении возникают локальные пластические деформации, которые изменяют первоначальные значения остаточных напряжений. Следует иметь в виду, что предел упругости при циклических нагрузках ниже, чем при статических в соответствии с эффектом Берстоу [7]. Это в равной мере относится к растягивающим и сжимающим напряжениям, но отмечается, что предел упругости при сжатии несколько выше, чем при растяжении. В случаях, когда пластическая деформация, вызванная переменными напряжениями, превышает первоначальную остаточную деформацию, в детали может наблюдаться даже изменение знака остаточных напряжений [7]. Биргер И. А. полагает, что уменьшение остаточных напряжений особенно интенсивно происходит при первых циклах нагружения, а затем стабилизируется. В одних работах отмечается, что интенсивное падение остаточных напряжений наблюдается до  $3 \dots 5 \cdot 10^3$  циклов, в других —  $1,35 \cdot 10^6$  и  $2,37 \cdot 10^6$  циклов.

Снижение напряжений наблюдается в большей степени для материалов с относительно низкими значениями предела текучести, например для низкоуглеродистых сталей. При объемной схеме напряженного состояния остаточных напряжений и напряжений от внешних переменных нагрузок снижение остаточных напряжений незначительно, так как пластическая деформация в этих условиях стеснена.

Если суммарные напряжения, остаточные и переменные, не превосходят предела упругости материала, то остаточные напряжения мало изменяются при действии переменных циклических напряжений.

Вибрационную обработку можно рассматривать как переменное циклическое нагружение. Установки для снижения остаточных напряжений методом вибрации частотой до 100 Гц в настоящее время уже выпускаются серийно.

Действие установки основано на том, что напряжения на границах зерен и в решетке, возникновение которых можно объяснить образованием дислокаций и дефектами кристаллической решетки, гасятся вибрационными колебаниями. Внутреннее трение возникает в местах с большими остаточными напряжениями и обуславливает

высокое локальное энергетическое состояние, в результате чего становится возможным смещение дислокаций к границам зерен и происходит незначительная диффузия атомов, что в свою очередь приводит к релаксации остаточных напряжений. При этом снижается энергия, необходимая для вибрации.

Методом вибраций можно обрабатывать также и те заготовки, которые согласно требованиям технических условий нельзя подвергать термической обработке для снятия остаточных напряжений. Колебания в металлической решетке затухают не равномерно, а преимущественно в тех участках, где вследствие дефектов решетки проявляется неоднородность напряжений и затруднено распространение чисто упругих колебаний. Поэтому в местах образования дислокаций наблюдается повышение уровня энергии, в результате чего эти дислокации и поля напряжений перемещаются таким образом, что происходит снятие остаточных напряжений.

Так как остаточные напряжения вызывают затухание колебаний, а связанные с этим затраты энергии компенсируются энергией, сообщаемой при вибрации, вызываемой работой двигателя, по расходу электрической энергии можно судить об изменении напряженного состояния. Если расход электрической энергии уменьшается, можно сделать вывод о снятии остаточных напряжений.

Так как вибрация ведет только к релаксации напряжений, без местного пластического течения, то в результате не происходит никаких изменений геометрических размеров заготовки. Вибрация не оказывает никакого воздействия на предел текучести и прочности материала [5].

Вибрационные методы могут быть эффективно использованы для снятия остаточных напряжений в металлических деталях больших габаритов и веса, имеющих замкнутый контур типа колец, оболочек, труб и т. п. В патенте [103], в частности, предлагается возбуждать вибрацию в нескольких точках детали на резонансной частоте последовательно по периметру детали. При этом каждое последующее место возбуждения вибрации следует располагать в узле колебаний предыдущей точки возбуждения. Если колебания резонансной частоты возбуждаются только в двух, например диаметрально расположенных точках контура оболочек, то наблюдается неравномерное снятие остаточных напряжений по периметру сечения. Изделие, вибрируя на первой собственной частоте и деформируясь при этом, принимает соответствующую форму, при которой по длине сечения возникают четыре пучности

и четыре узла. В пучностях снижение остаточных напряжений максимально, в узлах — минимально или близко к нулю, потому что металл сечения детали в узле практически не деформируется, так как в этих точках перемещения минимальны и изгибающий момент отсутствует.

Одним из эффективных способов уменьшения остаточных напряжений в металлоизделиях и, в частности, в холоднодеформированных трубах является применение ультразвуковых колебаний. Установлено, что использование ультразвуковых колебаний при безоправочном и оправочном волочении труб уменьшает остаточные напряжения на 16...30 % [5]. Этот способ воздействия на остаточные напряжения с целью их уменьшения осуществляется совместно с основным технологическим процессом волочения, прокатки и т. п. Исследования проводились на трубах из сталей 10, 20 и 12Х18 Н10 Т после однократного и многократного волочения с ультразвуковыми колебаниями и без них.

Безоправочное волочение труб со скоростью 0,67 м/с осуществлялось на линейном стане. Ультразвуковые колебания от генератора УЗГ-2—10 через волновод передавались на волоку, помещенную в пучность колебаний продольной стоячей волны. Амплитуда колебаний варьировалась в пределах 0,02...0,05 мм. Скорость распространения волны во всех случаях была больше скорости волочения.

При безоправочном волочении с наложением ультразвукового контроля (УЗК) трубы готовили по обычной технологии: забивка головок, отжиг, травление, промывка, нейтрализация, промывка, омеднение, фосфатирование. При оправочном волочении ультразвуковые колебания подвели на оправку от одного и двух преобразователей типа ПМС-15 А-18 через концентратор. Электрическая мощность преобразователей составила соответственно 4,5 и 9 кВт. Амплитуда колебаний на торце оправки менялась в пределах 0,015...0,05 мм (по результатам измерения виброметром типа УБВ-2 М).

Для сталей 10 и 20 тангенциальные и осевые остаточные напряжения уменьшаются на 80...100 МПа при волочении с применением ультразвуковых колебаний (см. рис. 44). Если учесть, что после безоправочного волочения часто образуются продольные силы трения в результате действия тангенциальных остаточных напряжений, то можно заключить, что волочение с ультразвуком резко уменьшает неравномерность деформации и позволяет увеличить предельно допустимые коэффициенты вытяжки.



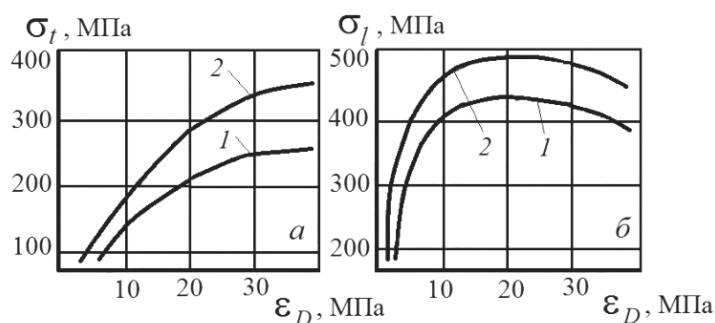


Рис. 44. Остаточные тангенциальные  $\sigma_t$  — а и продольные  $\sigma_l$  — б напряжения после безоправочного волочения труб из стали 10–20 с наложением ультразвуковых колебаний (1) и без них (2)

По своей величине тангенциальные напряжения значительно превосходят продольные — в среднем на 400 МПа.

При многократном волочении зависимость напряжений от степени деформации более сложная. Отсутствует четко выраженный максимум, остаточные напряжения интенсивно нарастают в области высоких (более 45 %) обжатий по диаметру. Увеличение остаточных напряжений при нарастании деформаций приводит к увеличению количества разрушившихся труб. При волочении с ультразвуком растрескивание труб существенно уменьшается. Разрушение всех труб, протянутых с УЗК, можно ожидать лишь при обжатии по диаметру более 80 %.

Таким образом, применение ультразвуковых колебаний при безоправочном волочении труб дает возможность значительно повысить разовые и суммарные деформации без увеличения опасности задержанного разрушения протянутых труб от остаточных напряжений.

В противоположность термической обработке применение поверхностной деформации не устраняет остаточные напряжения, а создает в поверхностном слое сжимающие напряжения, которые значительно повышают надежность и долговечность металлопродукции. При этом резко сокращаются трудозатраты, количество необходимого оборудования, число технологических операций, поскольку часто процесс регулирования остаточных напряжений совмещается с последней операцией изготовления изделий.

При дробеструйной обработке или обкатке поверхности роликами в поверхностных слоях возникают сжимающие остаточные напряжения. Раздавливание поверхностного слоя приводит к увеличению

линейных размеров элементов поверхности, и в поверхностном слое образуется однородное поле сжимающих остаточных напряжений [7]. Эти напряжения уравниваются небольшими по величине растягивающими напряжениями в центральных объемах изделия. Сжимающие поверхностные напряжения, близкие по величине к пределу текучести, могут распространяться на глубину 1...2 мм.

Для гладких образцов при изгибе и кручении предел выносливости после накатки или обдувки дробью может быть увеличен на 10...30 %. Поверхностное механическое упрочнение особенно эффективно при наличии концентраторов напряжений (галтели, отверстия, канавки и т. п.). Замечено существенное увеличение прочности деталей с наклепанной поверхностью при работе в условиях коррозии, в том числе при коррозии трением.

Экспериментально установлено, что эффект поверхностного наклепа сказывается в наибольшей степени для сплавов с повышенной твердостью. Повышение усталостной прочности и коррозионной стойкости при наклепе поверхности объясняется двумя основными причинами: благоприятным влиянием сжимающих остаточных напряжений и улучшением механических свойств поверхностного слоя в результате поверхностного упрочнения.

Еще в 60-е годы XX века был в исследованиях замечен эффект снижения уровня остаточных напряжений в металлоизделиях любой конфигурации и сварных конструкциях в процессе электрогидроимпульсной обработки. Сущность этого метода заключается в обработке напряженных участков изделия многократными импульсами давления, генерируемыми высоковольтными разрядами в воде. Снижение остаточных напряжений происходит в основном вследствие активации возбуждаемыми в металле волнами напряжений естественных дислокационно-сдвиговых релаксационных процессов. Исследованиями, выполненными в НТЦ «Вега» Института импульсных процессов и технологий совместно с Институтом проблем литья (НАН Украины), показано, что уровень снятия внутренних напряжений в процессе электрогидроимпульсной обработки соответствует уровню, достигаемому при термической обработке деталей любой конструктивной сложности. Уровень снижения остаточных напряжений может составлять 40...60 %.

Идея метода основывается на гипотезе неравномерного распределения напряжений в реальных сплавах на макро- и микроуровне



и формирования локальных напряжений противоположного знака. Большинство металлов и сплавов способно повышать свою релаксационную стойкость в процессе повторяющихся импульсных нагружений концентрированными источниками энергии. Установлено экспериментально, что такое воздействие проявляется в образовании пересекающихся плоских скоплений дислокаций.

Таким образом, электрогидроимпульсная обработка может быть применена вместо термообработки для снятия и перераспределения внутренних напряжений в холоднодеформированных металлоизделиях.

В плане снижения уровня остаточных напряжений в изделиях после пластической деформации и термической обработки представляют интерес эффекты электропластической обработки [102].

В настоящее время установлено наличие резкого снижения сопротивления металла деформации и повышение пластичности под влиянием электрического тока большой плотности (порядка  $10^5$  А/см<sup>2</sup>) или под влиянием интенсивного электронного облучения. Это явление было условно названо электропластическим эффектом. Импульсы тока или облучения имеют длительность  $10^{-5} \dots 10^{-4}$  с, что на несколько порядков меньше длительности стимулированных ими скачков деформации в кристаллах. Стимулирование пластической деформации металлических кристаллов короткими импульсами открывает новые возможности в области исследования скачкообразной деформации. Подобный метод воздействия повышает однородность деформации кристаллов, способствует релаксации напряжений, позволяет управлять процессами зарождения и развития дислокационной структуры.

Использование тока высокой плотности в зоне деформации технически важных материалов позволяет интенсифицировать процесс обработки их давлением, что особенно важно для тугоплавких и труднодеформируемых металлов и сплавов. Сокращается число технологических переходов, расход дорогостоящего обрабатывающего инструмента и улучшаются физико-механические свойства материала после обработки. На основе электропластического волочения и прокатки могут быть созданы новые высокопроизводительные способы и технологические процессы обработки давлением ряда технически важных материалов.

Эффективность электропластической обработки установлена при волочении проволоки из аустенитной стали [102]. Возникающие при

обработке проволоки во время волочения импульсными токами высокой плотности снижения сопротивления материала деформированию, перестройка текстуры проволоки, изменение степени ее совершенства и, наконец, резкое уменьшение  $\alpha$ -фазы в проволоке, влияющее на ее электрическое сопротивление и степень упрочнения, можно объяснить электропластическим действием тока на аустенитную фазу в стальной проволоке, из которой состоит в основном отожженный исходный материал.

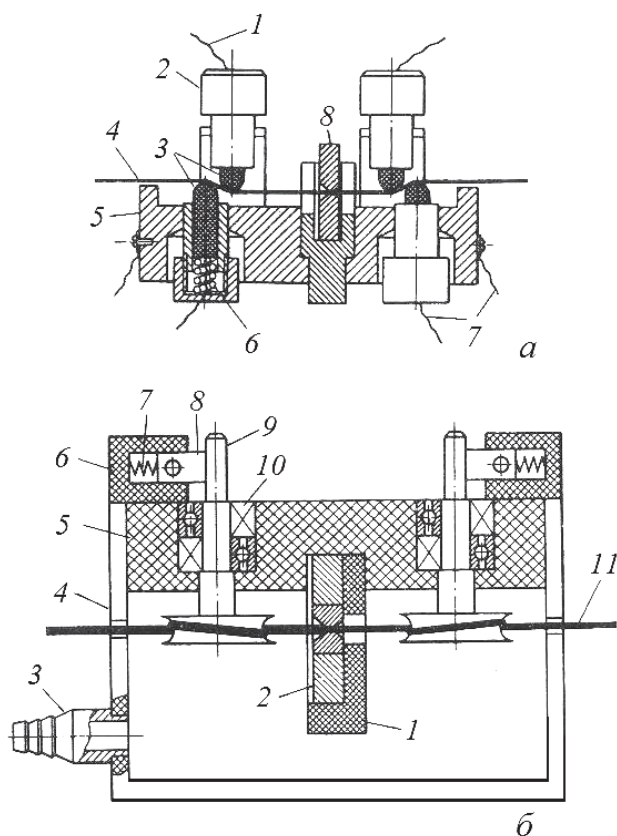


Рис. 45. Устройства для подведения тока в зону волочения металла с помощью скользящих контактов — *а* и вращающихся роликов — *б*

*а:* 1, 7 — токоподводящие провода; 2 — держатель контакта; 3 — контакты; 4 — материал, подвергаемый волочению; 5 — корпус волокодержателя; 6 — пружина; 8 — волока; *б:* 1 — волокодержатель; 2 — волока; 3 — штуцер для шланга, подающего охлаждающую жидкость; 4 — стенка корпуса; 5 — текстолитовая плита; 6 — держатель щеточного контакта; 7 — пружина; 8 — скользящий контакт; 9 — ось роликового контакта; 10 — подшипники; 11 — проволока

Повышение пластичности текстуры проволоки, изменение степени ее совершенства и, наконец, резкое уменьшение  $\alpha$ -фазы в проволоке, влияющие на ее электрическое сопротивление и степень упрочнения, можно объяснить электропластическим действием тока на аустенитную фазу в стальной проволоке, из которой состоит в основном отоженный исходный материал. Повышение пластичности аустенитной фазы снижает уровень внутренних остаточных напряжений при волочении проволоки.

При проведении волочения ток в зону обработки нержавеющей стали подводится либо с помощью волок или вращающимися латунными и медно-графитовыми щеточными контактами, как это показано на рис. 45. Участок проволоки, находящийся под действием тока, в этом случае охлаждается проточной эмульсией, содержащей триэтаноламин и олеиновую кислоту. Скорость волочения составляет 0,5...3,0 м/с.

### 6.3. Технологические приемы, направленные на снижение остаточных напряжений в холоднотянутых металлоизделиях

Большинство технологических приемов при производстве проволоки, прутков и труб, нацеленных на снижение уровня остаточных напряжений или их перераспределение в сечении изделия, сводится к применению малых обжатий при повторном волочении через сдвоенные волокна. Идея применения малых обжатий принадлежит Бюлеру, который провел широкие исследования и нашел возможность снижения остаточных напряжений в прутках и проволоке [86, 87, 96].

Экспериментально установлено, что оптимальные результаты по снижению и перераспределению в объеме остаточных напряжений достигаются в интервале обжатий повторного волочения 0,6...3 % [86]. Однако эти величины могут колебаться в зависимости от свойств материалов, профиля инструмента, условий волочения. Например, обжатия до 1 % создают сжимающие напряжения на поверхности прутков из низкоуглеродистой стали. Но уже при обжатии 1,6 % на поверхности возникают растягивающие и продольные остаточные напряжения.

Обзор результатов изучения влияния малых обжатий на остаточные напряжения в прутках и проволоке приведен в работе [5]. В исследованиях разных факторов не прослеживается однозначная связь между величиной обжатий и уровнем остаточных напряжений. Так,

Накумура получал сжимающие напряжения на поверхности проволоки диаметром 4 мм после волочения с обжатием 2,5 %. При исследовании влияния обжатий в диапазоне 0,25...10 % за проход на распределение остаточных напряжений в патентированной стальной проволоке

Нисиока установил, что максимум поверхностных сжимающих напряжений (продольных) соответствует обжатиям порядка 0,7...0,8 %. Появление продольных растягивающих напряжений наблюдалось исследователем лишь при обжатии 7 %. В то же время Бюлер установил, что при волочении стальной сильно наклепанной проволоки ( $\sigma_B = 1300$  МПа) с обжатием 1,3 % остаточные напряжения на поверхности проволоки снизились лишь на 35 %. Бюлер считает, что для полного снятия остаточных напряжений в такой проволоке необходимы обжатия порядка 3 %.

При волочении через двоянные волокна также возможно возникновение сжимающих остаточных напряжений в поверхности стальной проволоки. Такие остаточные напряжения были получены при волочении проволоки из стали 50 при обжатии в рабочей (первой по ходу волочения) волоке в пределах 24...30 %, а в калибрующей — 3...6 % [5]. В этом случае вместо растягивающих продольных напряжений около 800 МПа в тонком поверхностном слое создаются сжимающие напряжения до 1000 МПа.

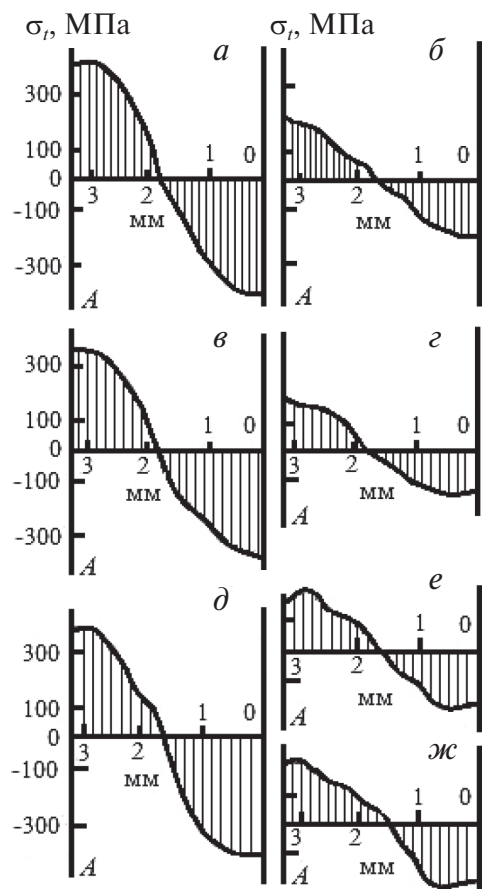


Рис. 46. Изменение остаточных тангенциальных напряжений  $\sigma_t$  в трубах (А — наружная поверхность) после безоправочного волочения при вторичном безоправочном волочении с малыми обжатиями:

- а —  $\varepsilon_D = 34,3\%$ ; б —  $\varepsilon_D = 33,4 \rightarrow 3,3\%$ ;  
 в —  $\varepsilon_D = 38,1\%$ ; г —  $\varepsilon_D = 37,6 \rightarrow 2,7\%$ ;  
 д —  $\varepsilon_D = 36,3\%$ ; е —  $\varepsilon_D = 35,6 \rightarrow 1,7\%$ ;  
 ж —  $\varepsilon_D = 36,3 \rightarrow 1,2\%$

При внедрении на Первоуральском новотрубном заводе многопроходного волочения труб без промежуточных отжигов был опробован способ снижения остаточных напряжений после безоправочного и короткооправочно-го волочения путем повторного безоправочного волочения с малыми обжатиями по диаметру, при которых пластическая деформация в основном локализуется в поверхностном слое трубы [5]. Опытное волочение осуществлялось на цепном линейном стане со скоростью 28 м/мин предварительно фосфатированных и омыленных труб. При повторном безоправочном волочении калибровочный проход выполнялся с обжатиями 1,2...3,3 %, а при короткооправочном — 0,3...0,7 %. Известно, что у труб после безоправочного волочения достаточно высокие растягивающие напряжения в стенке трубы возникают уже при обжатии 8...10 %. Изучалось влияние обжатия повторного волочения на уровень тангенциальных остаточных напряжений, поскольку именно эти напряжения определяют основные эксплуатационные свойства труб. На рис. 46 и 47 приведены полученные в этих опытах распределения по стенке трубы окружных напряжений соответственно после повторного безоправочного и короткооправочно-

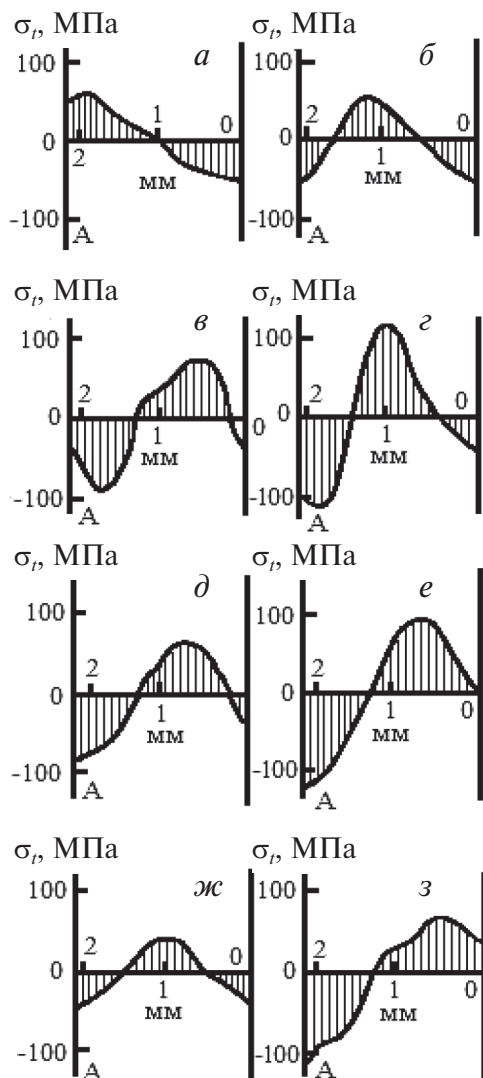


Рис. 47. Изменение  $\sigma_t$  в трубах (А — наружная поверхность) после волочения на короткой оправке при безоправочном волочении с малыми обжатиями:

$a - \varepsilon_D = 6,6 \%, \varepsilon_S = 30,1 \%$ ;  $б - \varepsilon_D = 6,9 \rightarrow 0,3 \%$ ;  $в - \varepsilon_D = 11 \%, \varepsilon_S = 32,2 \%$ ;  $г - \varepsilon_D = 11,2 \rightarrow 0,7 \%$ ;  $д - \varepsilon_D = 15,6 \%, \varepsilon_S = 32,7 \%$ ;  $е - \varepsilon_D = 15,9 \rightarrow 0,5 \%$ ;  $ж - \varepsilon_D = 19,8 \%, \varepsilon_S = 31,1 \%$ ;  $з - \varepsilon_D = 19,9 \rightarrow 0,6 \%$

го волочения. В опробованном диапазоне вторичных обжатий после безоправочного волочения тангенциальные напряжения надежно снижаются как на наружной, так и на внутренней поверхностях трубы. Однако характер распределения этих напряжений по толщине стенки принципиально не меняется. Во всех случаях на наружной поверхности сохраняются растягивающие остаточные напряжения. Можно предположить, что подобный характер распределения имеют и продольные напряжения.

У труб после волочения на короткой оправке вместо небольших растягивающих напряжений на наружной поверхности возникают сжимающие напряжения. Если на наружной поверхности в результате предыдущей обработки уже действовали сжимающие тангенциальные напряжения, то после повторного волочения и поверхностной пластической деформации они возрастают по абсолютной величине.

Аналогичные технологические рекомендации по снижению остаточных напряжений в трубах даются в работе [49]. Уменьшить остаточные напряжения в трубах можно вторичным волочением без оправки с малыми обжатиями по диаметру в пределах 0,3...3,3 %. Вторичное волочение без оправки с обжатием 1,2...3,3 % снижает тангенциальные остаточные напряжения в трубах после волочения без оправки на 29...63 %. Для уменьшения окружных остаточных напряжений после короткооправочного волочения авторы [49] рекомендуют применять безоправочное волочение с обжатием по диаметру 0,3...0,7 %. В результате этого растягивающие напряжения на наружной поверхности переходят в сжимающие, а сжимающие увеличиваются еще больше.

Такие способы уменьшения остаточных напряжений могут быть эффективно применены для снижения уровня тангенциальных напряжений в трубах из сталей, склонных к растрескиванию после волочения без оправки (например, стали 30ХГСА, 20 А и др.).

Как уже отмечалось, неравномерность пластической деформации в волоке и характер распределения остаточных напряжений зависят от степени деформации, полуугла наклона конической части волоки, противонапряжения, длины калибрующего пояса, коэффициента трения и скорости волочения. Исследование методом решения задач термоупругопластичности показало, что наибольшее влияние оказывают единичные обжатия и углы волок [58]. В результате решения определены оптимальные параметры последней волоки:  $\varepsilon = 10\%$ ,  $\alpha_{\text{опт}} = 3...5^\circ$ . При анализе известного маршрута волочения проволоки диаметром



5 мм из стали 80 установлена целесообразность перераспределения частных обжатий по проходам. Маршрут 7,2→6,6→6,0→5,5→5,0 мм заменен на маршрут 7,2→6,4→5,8→5,3→5,0 мм. Исследование оптимального решения позволяет снизить продольные остаточные напряжения на поверхности с 1360 до 860 МПа при сопротивлении металла пластической деформации 1500 МПа.

Для сравнения был рассмотрен также вариант, когда управляющим параметром был только полуугол последней волоки. Изменение его с существующего значения  $\alpha = 8^\circ$  до оптимального  $\alpha = 3^\circ$  позволяет снизить продольные остаточные напряжения на поверхности проволоки с 1360 до 1040 МПа, то есть на 23,5%.

В работе [111] авторы описывают способ снижения остаточных напряжений в нержавеющей холоднокатаных трубах. Кафедрой «Обработка металлов давлением» Уральского федерального университета совместно с ОАО «ПНТЗ» разработан способ термической обработки и правки труб растяжением. Способ предусматривает электроконтактный нагрев трубы с натяжением ее при нагреве и последующем охлаждении и обеспечивает уменьшение растягивающих остаточных напряжений в стенке трубы. Предложенный способ был опробован в производственных условиях при термической обработке теплообменных труб размером 16×1,5 мм из стали 08X18 Н10 Т по ТУ 14–3 Р-197–2001. Конструкция установки показана на рис. 48.

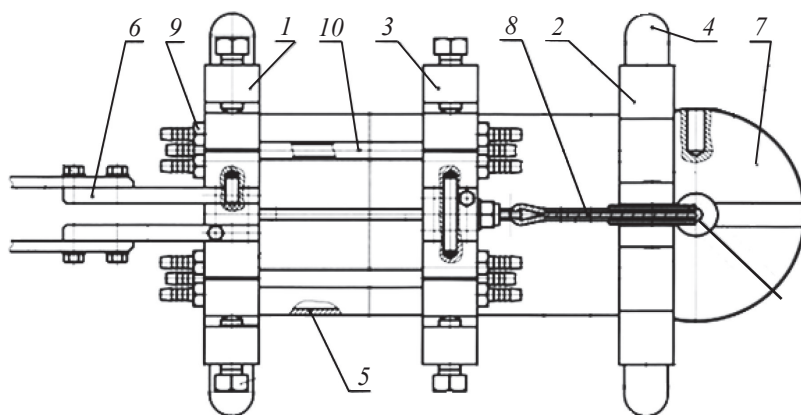


Рис. 48. Общий вид (вид сверху) установки электроконтактного нагрева труб с растяжением:

1 — передняя поперечина; 2 — задняя поперечина; 3 — подвижная поперечина; 4 — опора; 5 — станина; 6 — шина токоподвода; 7 — пневматическое устройство натяжения; 8 — канат; 9 — штуцер системы охлаждения; 10 — нагреваемая труба

Установка электроконтактного нагрева включает две неподвижные поперечины 1 и 2 (см. рис. 48) и одну подвижную 3. Неподвижные поперечины снабжены опорами 4, определяющими высотное положение технологической оси установки относительно пола цеха. Неподвижные поперечины соединяются двумя станинными балками 5, одновременно исполняющими роль продольных направляющих для подвижной поперечины. На поперечине 1 установлены электроизолированные токоподводящие контакты с медными шинами 6, к которым подключаются кабели источника питания. На подвижной поперечине 3 смонтированы зажимные контакты, замыкающие концы труб. Натяжение в процессе нагрева и охлаждения создавалось при помощи пневматического устройства 7, позволяющего поддерживать постоянную осевую нагрузку в течение термообработки. Натяжение также необходимо для компенсации теплового удлинения труб и предотвращения провисания труб при их нагреве. Все токоподводящие медные зажимные контакты снабжены системой водяного охлаждения с подводом и отводом воды посредством гибких рукавов, присоединенных через штуцеры 9. Длина троса 8 регулируется в пределах допустимого смещения поперечины 3 при настройке установки на конкретную длину обрабатываемых труб. Общая длина установки может быть изменена заменой станинных балок.

Для осуществления электроконтактного нагрева подвижная поперечина 3 (см. рис. 48) устанавливается в позицию, соответствующую длине труб. Две трубы одинаковой длины, концами длиной по 50 мм устанавливаются в V-образные разъемы контактов. При помощи каната 8 (см. рис. 48) обеспечивается заданное осевое натяжение, которое не должно превышать сопротивление деформации металла труб при максимальной температуре нагрева.

Устройство натяжения труб работает следующим образом. После закрепления труб в токоподводящих контактах устройства нагрева с помощью рукоятки стальной канат 8 наматывается на барабан. При этом поршень поднимается вверх до крайнего положения. После этого угловое положение барабана фиксируется. В пневмоцилиндр (в штоковую полость) подается сжатый воздух или газ регламентированного давления, например из баллона, на выходе которого установлен редукционный клапан и манометр. В процессе нагрева и охлаждения давление воздуха или газа в полости пневмоцилиндра регулируется для обеспечения заданных технологических коэффициентов напря-



женного состояния  $S = \frac{F \cdot p_k}{f \cdot \sigma_{st}}$ , где  $F$  — площадь поперечного сечения

рабочей полости пневмоцилиндра;  $f$  — суммарная площадь поперечного сечения нагреваемых труб;  $p_k$  — давление воздуха или газа в цилиндре;  $\sigma_{st}$  — сопротивление деформации металла труб при текущем значении температуры нагрева.

Установка рассчитана на одновременную термическую обработку с натяжением двух последовательно соединенных труб, подключаемых к вторичной обмотке трансформатора источника питания. Ток подводился к передним концам труб, задние концы соединялись перемычкой. Такая схема подвода электрического тока позволила исключить использование длинных шин и, следовательно, сократить потери электрической мощности.

Было установлено, что оптимальными являются режимы нагрева при следующих параметрах: сила тока 550÷600 А, напряжение 75÷77 В соответственно, время термообработки 3 минуты. Металл труб, термообработанных по указанным режимам, стоек против МКК (метод АМУ ГОСТ 6032).

В рамках данной работы проведены испытания труб на остаточные напряжения в соответствии с РИ 25–56–2006 и кривизну по ТУ 14–3 Р-197–2001. Результаты испытаний приведены в табл. 8.

Таблица 8

**Режимы электроконтактного нагрева труб 16×1,5 мм  
из стали 08X18 Н10 Т**

Номер трубы	Параметры нагрева				
	Сила тока $I$ , А	Напряже- ние $U$ , В	Темпера- тура нагре- ва, °С	Время нагрева, с	Время выдержки, с
1; 2	420	58	940	90	45
3; 4	430	60	950	70	40
5; 6	500	70	1100	95	75
7; 8	550	75	1150	90	100
9; 10	600	77	1200	90	100
11; 12	650	80	1250	75	110
13; 14	760	105	1030	60	60
15; 16	800	105	1060	60	90

Как видно из табл. 8, в трубах, термообработанных предложенным способом, уровень растягивающих остаточных напряжений значительно ниже, а их кривизна на порядок меньше, чем в трубах после печного нагрева по применяемой технологии. Предлагаемый способ обеспечивает совмещение операций термической обработки и правки труб.

Апробация показала, что предложенный способ обеспечивает механические свойства, величину зерна и стойкость против межкристаллитной коррозии металла труб в соответствии с требованиями ТУ 14–3 Р-197–2001. Кривизна и уровень растягивающих остаточных напряжений в трубах, термообработанных предложенным способом, на порядок величины меньше, чем в трубах, после печного нагрева.

Результаты апробации использованы при разработке конструкции промышленной установки, позволяющей осуществлять термическую обработку и правку труб при заданном коэффициенте напряженного состояния [112]. Предлагаемый конструктивный вариант установки представлен на рис. 49, *а*, 49, *б*, 50. На рис. 49, *а* показан продольный вертикальный разрез В-В двухпозиционной электроконтактной установки термической обработки и правки растяжением труб и продольный горизонтальный разрез А-А электроконтактной установки в исходном состоянии; на рис. 49, *б* — разрез А-А установки в рабочем состоянии.

В исходном положении трубы 4 установлены одним концом в неподвижные токоподводящие контакты 2 и зажаты с регламентированным радиальным усилием прижимами 3. Электропитание трансформатора отключено. Поршень гидроцилиндра 9 и плунжер 11 находятся в крайних задних положениях, при этом плунжер 11 упирается в упоры 15, установленные в положение, задающее расчетную длину хода плунжера  $L_n$ . Пневмораспределитель ПР отключен (Э3 и Э4 обесточены) и в рабочей полости воздух или газ находятся под атмосферным давлением  $p_a$ . Суппорт 5 с подвижными замыкающими контактами 6 находится в крайнем заднем положении (на рис. 49, *а* и 49, *б* крайнее левое положение). Гидрораспределитель ГР обесточен (Э1 и Э2 выключены) и обе полости гидроцилиндра 9 соединены со сливной магистралью гидросистемы.

Работа начинается с установки платформы 8 в положение, соответствующее длине заготовок 4, и фиксации платформы относительно направляющих станины 1. Задание на термическую обработку и правку растяжением представляется совокупностью параметров:

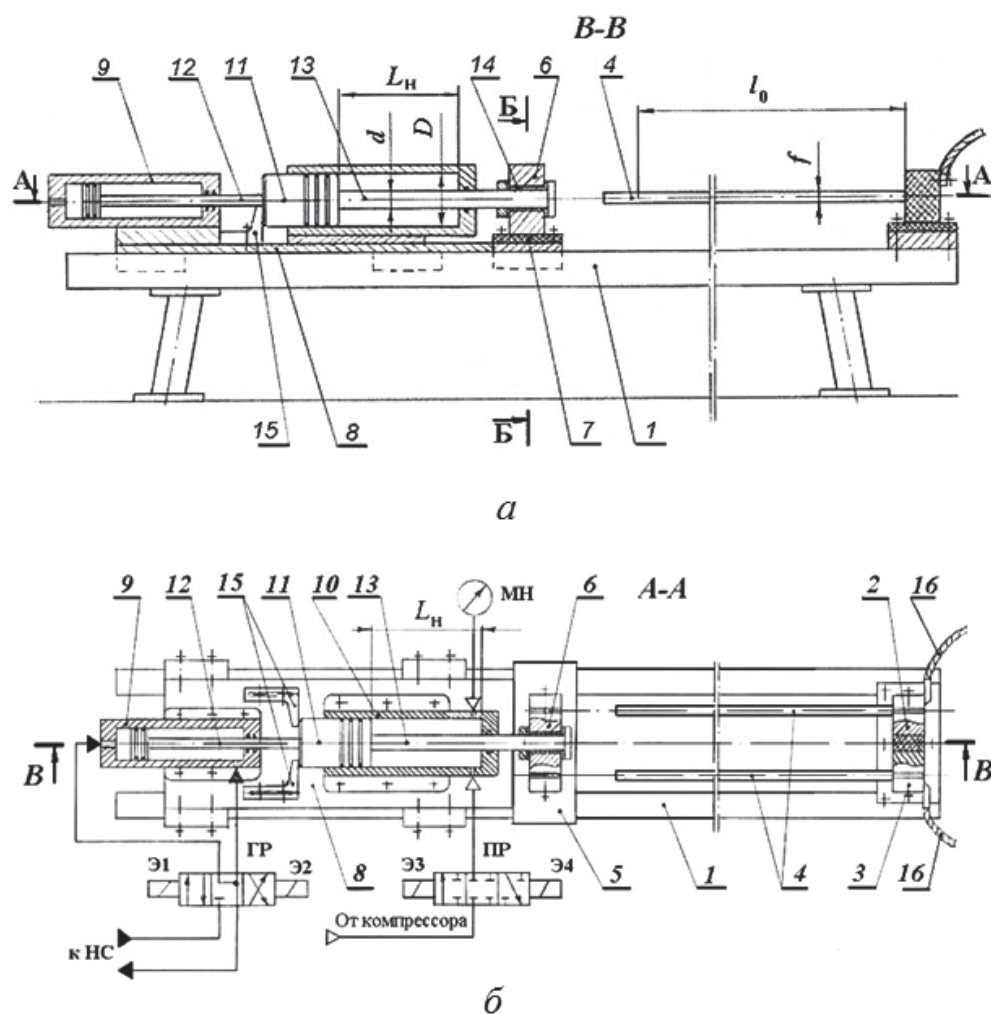


Рис. 49. Конструктивная схема установки:

*а* — продольный вертикальный разрез В-В установки; *б* — продольный горизонтальный разрез А-А установки в исходном состоянии: 1 — станина; 2 — неподвижные контакты, 3 — прижимы; 4 — труба; 5 — суппорт; 6 — подвижный контакт; 7 — изоляционная прокладка; 8 — платформа; 9 — поршневой гидроцилиндр; 10 — плунжерный пневмоцилиндр; 11 — плунжер; 12 — шток гидроцилиндра, 13 — шток пневмоцилиндра; 14 — фланцевая втулка; 15 — упоры, 16 — клеммы вторичной обмотки

конечная температура нагрева  $t_k$ ; степень деформации осевого пластического растяжения для правки заготовок  $\varepsilon$ ; коэффициенты напряженного состояния при растяжении заготовок в начале  $S_0$  и в конце нагрева  $S_k$ , по которым определяются относительные силы натяжения труб в начале и в конце нагрева, кН, по формулам:

$$P'_0 = S_0 \cdot \frac{\sigma_{s0|t=t_0}}{p_a} \cdot \frac{f}{F} \text{ и } P'_k = S_k \cdot \frac{\sigma_{s|t=t_k}}{p_a} \cdot \frac{f}{F}, \quad (65)$$

где  $\sigma_{s0|t=t_0}$  — сопротивление деформации металла заготовок в отожженном состоянии при температуре окружающей среды  $t_0$ ;  $\sigma_{s|t=t_k}$  — сопротивление деформации металла заготовок при температуре  $t_k$  (определяется по кривой упрочнения);  $f$  — суммарная площадь сечения обрабатываемых труб;  $F$  — площадь сечения рабочей полости пневмоцилиндра.

Определяется начальное положение  $L_n$ , мм, плунжера 11 пневмоцилиндра 10 по формуле

$$L_n = l_0 \cdot \alpha \cdot (t_k - t_0) \frac{(1 + P'_0)(1 + P'_k)}{P'_0 + P'_k}, \quad (66)$$

где  $l_0$  — длина нагреваемой части заготовок (см. рис. 49, а, 50);  $\alpha$  — коэффициент теплового линейного расширения металла заготовок.

Упоры 15, ограничивающие перемещение плунжера 11, устанавливаются в положение, соответствующее  $L_n$ , и фиксируются относительно платформы 8. Включением электромагнитов Э2 и Э4 гидрораспределитель ГР переводится в положение, обеспечивающее подачу рабочей жидкости от насосной станции НС в штоковую полость гидрораспределителя 9, а пневмораспределитель ПР соединяет рабочую полость пневмоцилиндра 10 с атмосферой. Плунжер 11 перемещается назад до упоров 15, обеспечивая заданную длину  $L_n$  рабочей полости пневмоцилиндра 10 (см. рис. 49, а). После выключения электромагнита Э4 пневмораспределитель устанавливается в нейтральное положение, перекрывая вход в рабочую полость пневмоцилиндра 10. Отключением Э2 перекрывается напорная гидромагистраль. В этом

положении в рабочей полости пневмоцилиндра давление воздуха или газа равно атмосферному  $p_a$ .

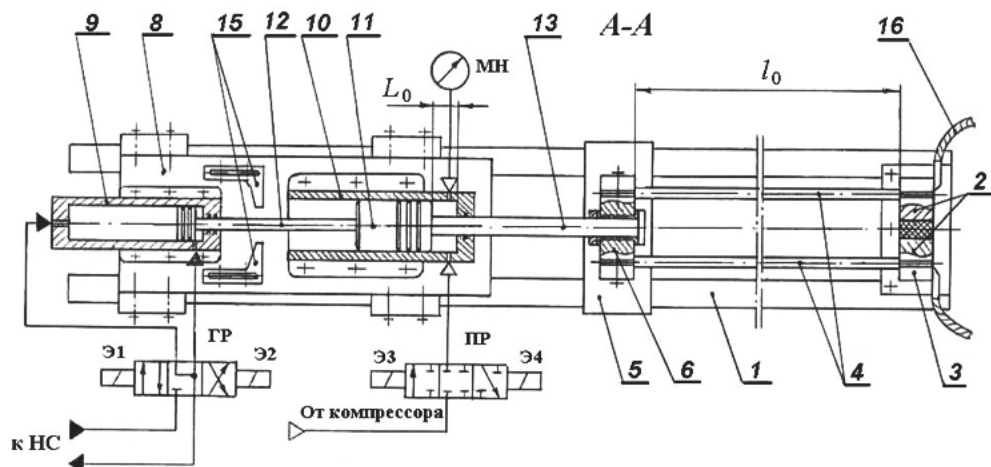


Рис. 50. Рабочее положение механизмов электроконтактной установки

Включением электромагнита Э1 рабочая жидкость высокого давления подается в поршневую полость гидроцилиндра 9. При этом его поршень, перемещаясь вперед, своим штоком смещает плунжер 11 в положение  $L_0$  (см. рис. 49, б), при котором в рабочей полости давление воздуха или газа возрастает до величины, соответствующей относительной силе  $P'_0$ . Величина  $L_0$  определяется выражением  $L_0 = L_n / (1 + P')$ . При этом давление в рабочей полости пневмоцилиндра 10 равно  $p_0 = P'_0 \cdot p_a$  и регистрируется манометром МН (см. рис. 49, а). После перевода плунжера 11 в переднее положение  $L_0$  его шток 13 смещает суппорт 5 с установленными на нем подвижными контактами 6 до ввода концов заготовок 4 в зажимы контактов 6. Концы заготовок зажимаются прижимами с регламентированным усилием, достаточным для надежного электрического контакта и не меньшим величины  $0,5 p_0 \cdot F$ . Подвижные замыкающие контакты 6 обеспечивают последовательное электрическое соединение обеих труб 4.

После отключения электромагнита Э1 гидрораспределитель переводится в нейтральное положение и обе полости гидроцилиндра 9 подключаются к сливной магистрали. В этот момент сила давления воздуха на плунжер 11, равная  $p_0 F$ , уравновешена суммарной силой натяжения заготовок, в которых возникает напряжение растяжения

$p_0 F / f$ . Если это напряжение равно пределу текучести металла заготовки в отоженном состоянии при температуре  $t = t_0$ , то оно не вызовет пластической деформации предварительно нагартованных труб. Подается напряжение на первичную обмотку трансформатора, а вторичная его обмотка посредством подводящих кабелей 16 создает в последовательно соединенных заготовках 4 электрический ток заданной плотности. Если площади сечений заготовок одинаковы и равны  $f/2$ , то и плотность тока и интенсивность нагрева заготовок совпадают.

В процессе нагрева заготовки удлиняются на величину  $l_0 \alpha (t - t_0)$ , где  $t$  — текущая температура заготовок в процессе нагрева от  $t_0$  до  $t_k$ ; при этом непрерывно уменьшается сопротивление деформации в соответствии с кривой упрочнения. Если считать степень и скорость пластической деформации при термическом удлинении заготовок равными нулю, то зависимость сопротивления деформации  $\sigma_s$  от температуры близка к линейной. При удлинении заготовок суппорт 5 и плунжер 11 перемещаются назад и объем рабочей полости пневмоцилиндра 10 увеличивается. Давление воздуха или газа в пневмоцилиндре уменьшается пропорционально смещению плунжера. Снижается линейно и сила натяжения заготовок. В этом случае коэффициент напряженного состояния линейно меняется от  $S_0$  до  $S_k$ , а если по технологическому заданию  $S_0 = S_k$ , то коэффициент напряженного состояния сохраняет свою величину в течение всего процесса нагрева до  $t_k$ , то есть сохраняется отношение напряжения натяжения заготовки к сопротивлению деформации материала заготовок. При нагреве до  $t_k$  напряжение растяжения заготовок составит величину, равную  $S_k \cdot \sigma_{s|t=t_k}$ . Если по заданию  $S_k = 0$ , то по завершении нагрева до  $t_k$  произойдет полная механическая разгрузка от силы натяжения.

После завершения нагрева до  $t_k$  и технологической выдержки питание трансформатора отключается и начинается охлаждение заготовок естественное или принудительное (система принудительного охлаждения не рассматривается). Заготовки, укорачиваясь, перемещают вперед суппорт 5 и плунжер 11 пневмоцилиндра 10. При полном охлаждении заготовок до  $t_0$  плунжер занимает исходное положение  $L_0$  и создает в рабочей полости давление  $p_0$ . Если по заданию  $S_0 > 1$ , то есть  $p_0 F / f > \sigma_{s0|t=t_0}$ , то реализуется пластическая деформация со степенью  $\epsilon$ , рекомендуемая для правки растяжением.

После охлаждения заготовок включением электромагнита Э1 рабочая жидкость подается в поршневую полость гидроцилиндра давле-

нием  $p_0 \cdot F / F_{\text{гц}}$ , где  $F_{\text{гц}}$  — площадь сечения поршневой полости гидроцилиндра 9. Заготовки, с которых при этом снята осевая нагрузка, извлекаются из зажимных контактов. Если технологическое задание в параметрах  $l_0$ ,  $t_k$ ,  $S_0$ ,  $S_k$ ,  $\varepsilon$  не меняется, то в контакты устанавливаются и зажимаются новые заготовки. Процесс работы установки повторяется с момента отключения электромагнита Э1. Если задание меняется, то работа возобновляется с установки нового положения  $L_n$ .

При обработке сравнительно длинных заготовок и при  $S_k \neq 0$  компрессорной установкой создается предварительное давление воздуха или газа  $p_k$  в рабочей полости пневмоцилиндра 10, когда плунжер занимает начальное положение  $L_n$ . При этом упоры 15 устанавливаются в положение, соответствующее значению  $L_n$ , мм, определяемому выражением

$$L_n = \frac{\Delta l}{\eta} \cdot \frac{(1 + P'_k)(1 + P'_0)}{P'_0 - P'_k}. \quad (67)$$

В формуле (67)  $\eta = p_k / p_0$ . Для создания давления  $p_k$  после установки плунжера 11 в положение  $L_n$  включается электромагнит Э3 и сжатый воздух или газ от компрессорной установки, настроенной на давление  $p_k$ , подается в рабочую полость пневмоцилиндра 10. После отключения Э3 входная магистраль перекрывается пневмораспределителем ПР, а в рабочей полости сохраняется воздух или газ под давлением  $p_k$ . Затем цикл работы проводится в том же порядке, что и при отсутствии в пневмоцилиндре предварительного избыточного давления. Крайнее положение плунжера 11  $L_0$ , мм, в этом случае равно

$$L_0 = \frac{L_n \cdot \eta}{1 + P'_0} \quad (68)$$

и фиксируется либо прямым замером перемещения плунжера  $L_n - L_0$ , либо по величине давления  $p_0 = P'_0 \cdot p_a$ , замеряемого манометром МН.

Выражения (67) и (68) для расчета исходного и конечного положений упоров 15 и плунжера 11 пневмоцилиндра 10 получены из следующих посылок. Сила осевого натяжения заготовок  $P_0$ , кН, перед началом нагрева, определяемая из технологических представлений



об эффективности электроконтактного нагрева при термической обработке, совмещенной с правкой растяжением, представлена в виде

$$P_0 = F \left( p_k \frac{L_H}{L_0} - p_a \right) = F p_a \left( \eta \frac{L_H}{L_0} - 1 \right), \quad (69)$$

$$L_0 = \frac{FL_H\eta}{F + \frac{P_0}{p_a}} = \frac{L_H\eta}{1 + \frac{P_0}{F p_a}} = \frac{L_H\eta}{1 + P'_0}. \quad (70)$$

Для силы натяжения заготовок (если такая сила предусматривается по технологическим соображениям) в конце нагрева  $P_k$ , кН, и крайнего положения плунжера используя выражения (69) и (70) можно записать подобные выражения (71) и (72)

$$P_k = F \left( p_k \frac{L_H}{L_0 + \Delta l} - p_a \right) = F p_a \left( \eta \frac{L_H}{L_0 + \Delta l} - 1 \right), \quad (71)$$

$$L_0 = \frac{\eta L_H - \left( \frac{P_k}{F p_a} + 1 \right) \Delta l}{\frac{P_k}{F p_a} + 1} = \frac{\eta L_H - \Delta l (P'_k + 1)}{P'_k + 1}. \quad (72)$$

Приравнявая выражения для  $L_0$ , уравнение  $\frac{\eta L_H}{1 + P'_0} = \frac{\eta L_H}{1 + P'_k} - \Delta l$  можно разрешить относительно  $L_H$ , получив выражение (67). Если величина  $L_H$  задана, то может быть подобрано давление  $p_k$  воздуха или газа, МПа, подаваемого в полость пневмоцилиндра от компрессорной установки:

$$p_k = p_a \frac{\Delta l}{L_H} \cdot \frac{(1 + P'_0)(1 + P'_k)}{P'_0 - P'_k}. \quad (73)$$

При проектировании установки такой конструкции расчет площади сечения рабочей полости пневмоцилиндра, мм<sup>2</sup>, выполняется



с использованием выражения (73) по формуле  $F = n - \sqrt{n^2 - m^2}$ , где  $n = \frac{L_n(P_0 - P_k) - \Delta l(P_0 + P_k)}{2(p_k - p_a)\Delta l}$ ,  $m = \frac{P_k P_0}{(p_k - p_a)^2}$ ,  $n$  и  $m$  — параметры, м<sup>2</sup>.

На установке описываемой конструкции правка труб растяжением может быть осуществлена более эффективно, чем на устройствах-аналогах, где упругопластическое растяжение заготовки проводится при достижении заданной температуры нагрева, когда величина осевого механического напряжения достигает предела текучести. При охлаждении напряжение натяжения профиля, естественно, ниже сопротивления металла пластической деформации, и заготовка находится в упругом состоянии. При охлаждении ее до температуры окружающей среды из-за любой тепловой асимметрии вновь возникают деформации изгиба как следствие релаксации остаточных напряжений. В предлагаемом устройстве пластическая деформация растяжения выполняется уже после охлаждения заготовки, поэтому возникновение новых деформаций изгиба невозможно. Управление величиной пластического удлинения при растяжении  $\varepsilon$  осуществляется соответствующим назначением величины силы осевого натяжения заготовки  $P_0$ , или относительной силы осевого натяжения  $P'_0$  перед началом нагрева. Если  $P_0 = f \sigma_{s0|t=t_0}$ , то при завершении охлаждения заготовки до  $t_0$  плунжер пневмоцилиндра 10 займет положение, определяемое координатой  $L_0$ , напряжение в сечении заготовки будет в точности равно сопротивлению деформации металла в отожженном состоянии при температуре  $t_0$  ( $\sigma_{s0|t=t_0}$ ).

Пластическая деформация в этой ситуации невозможна, поскольку при любом смещении плунжера 11 назад уменьшается давление  $p$  воздуха или газа в рабочей полости пневмоцилиндра, то есть  $pF < \sigma_{s0|t=t_0} \cdot f$ . Чтобы осуществить пластическое растяжение труб при правке на величину  $\varepsilon$ , плунжер 11 пневмоцилиндра 10 смещается с помощью гидроцилиндра 9 до положения, определяемого координатой  $(L_0 - \varepsilon \cdot l_0)$ . В этом случае

$$P_0 = (\sigma_{s0|t=t_0} + a\varepsilon^b) f \quad \text{и} \quad P'_0 = \frac{f \cdot \sigma_{s0|t=t_0} + a\varepsilon^b}{p_a}. \quad (74)$$

В формуле (72)  $a$  и  $b$  — коэффициенты аппроксимации кривой степенного упрочнения материала заготовки;  $P_0$  — сила осевого натяже-

ния заготовки, кН;  $P'_0$ , — относительная сила осевого натяжения заготовки, кН.

При назначении коэффициента напряженного состояния металла заготовки  $S_k$  в конце нагрева можно исходить из условия устранения провисания заготовки, которое может отрицательно сказаться на работе всей установки (короткое замыкание заготовки на корпус установки) и спровоцировать разрушение в зоне контакта из-за большого температурного градиента между нагреваемой частью заготовки и ее холодными зажимаемыми концами. Эта ситуация возникает, когда  $S_k$  меньше или равна нулю. Из практики проведения термообработки и правки растяжением с использованием электроконтактного нагрева рационально применять натяжение при  $S_k = 0,1 \dots 0,3$ , т. е. когда напряжение осевого натяжения составляет 10...30 % от величины сопротивления деформации металла заготовки при конечной температуре нагрева  $\sigma_{s|t=t_k}$ .

Описываемая конструкция электроконтактной установки позволяет в широком диапазоне управлять уровнем и распределением остаточных напряжений по сечению обрабатываемых заготовок. Это следует из рассмотрения закономерностей процесса возникновения остаточных напряжений в трубах при их механической и тепловой разгрузке после завершения термической обработки и правки. При медленном охлаждении заготовки без осевого натяжения даже малый температурный градиент по сечению порождает в поверхности продольные и тангенциальные растягивающие напряжения по причине большей температурной усадки охлажденных слоев металла. Как только заготовка охлаждается до интервала теплых деформаций (температура ниже температуры начала рекристаллизации), пластические деформации растяжения приводят к деформационному упрочнению металла поверхностных слоев. После полной разгрузки эти слои стремятся укоротиться на большую величину, чем центральные, что и приводит к появлению остаточных растягивающих напряжений, которые ухудшают эксплуатационные свойства изделий. Например, в теплообменных трубах из коррозионно-стойких сталей поверхностные растягивающие остаточные напряжения резко снижают стойкость против межкристаллитной коррозии и длительность безаварийной эксплуатации парогенераторов АЭС. При медленном охлаждении не удастся полностью избавиться от появления остаточных растягивающих напряжений в поверхностных слоях заготовки, но возможно их существенное снижение за счет релаксации напряжений при действии растягиваю-

щих напряжений, задаваемых при настройке заявляемой установки коэффициентом напряженного состояния  $S = 0,5...0,8$ .

Если термообработкой заготовки является закалка с интенсивным охлаждением поверхности, то в сечении любой формы возникают большие температурные градиенты. Когда закаливается труба без осевого натяжения охлаждением наружной поверхности, то температурное укорочение поверхностного слоя приводит к пластической осадке внутренних слоев металла. В результате действия сжимающих как осевых, так и тангенциальных напряжений со стороны поверхностных слоев металла уменьшается внутренний диаметр трубы вплоть до выхода за пределы допуска. При дальнейшем охлаждении внутренние горячие слои укорачиваются больше наружных холодных. В итоге в наружной поверхности всегда после полной разгрузки создаются сжимающие как осевые, так и тангенциальные остаточные напряжения. Рациональный выбор величины осевого натяжения, реализуемого на установке заданием коэффициента напряженного состояния, сохраняет достаточный уровень сжимающих остаточных напряжений на наружной (при охлаждении снаружи) или внутренней (при внутреннем охлаждении) поверхностях без допущения пластической деформации горячей части заготовки, выводящей ее размеры за допускаемые отклонения. Установка позволяет проводить охлаждение труб с любыми коэффициентами напряженного состояния от нуля до единицы, а конкретные их значения подбираются для каждого материала и для каждой конфигурации сечения заготовки. После задания требуемых по технологическим соображениям коэффициентов напряженного состояния  $S_0$  и  $S_k$  определяются значения  $P'_0$  и  $P'_k$  и по формуле (67) находится начальная установка  $L_n$  плунжера пневмоцилиндра. Вся настройка установки сводится к заданию  $L_n$ , исходя из технологических параметров термической обработки и правки заготовок растяжением.

Таким образом, применение описанной конструкции электроконтактной установки дает возможность осуществления нагрева и охлаждения труб с осевым натяжением, регламентированным технологией термической обработки и правки, что позволяет получать термообработанные прямолинейные трубы с благоприятно распределенными и приемлемыми по уровню остаточными напряжениями, а также упростить технологический процесс изготовления труб за счет исключения операции их дополнительной правки на валковых станах, ухудшающей качество поверхности и создающей неконтролируемое поле остаточных напряжений в трубе.

## Заключение

---

Современный уровень развития машиностроения требует непрерывного повышения качества металлопродукции и одним из путей в этом направлении является развитие представлений об остаточных напряжениях, методов их контроля, измерения, релаксации и управления их величиной. В этой связи необходимо комплексно взглянуть на проблему и рассмотреть все грани явления остаточных напряжений. Сейчас уже очевидно, что остаточные напряжения могут не только приводить к разрушению металлоконструкций, но и, наоборот, повышать их эксплуатационные характеристики в разы. Поэтому появляется все больше исследований, направленных на получение металлоизделий с заданным уровнем остаточных напряжений или определенным их распределением в слое металла.

В определенных областях народного хозяйства и промышленности, таких как точное машиностроение, медицина, атомная энергетика, авиастроение, космическая и военная промышленность, вопрос остаточных напряжений наиболее актуален. Ведь надежность и бесперебойная работа машин и механизмов ответственного назначения, таких как ракетные двигатели, атомные реакторы или искусственные органы, всегда стоит на первом месте в списке требований к оборудованию и металлоизделиям, используемым в таких объектах.

Коррозионная стойкость, долговечность, хладо- и жаростойкость, ударная вязкость и длительная прочность, радиационная стойкость — все эти и многие другие эксплуатационные характеристики зависят от остаточных напряжений. Появляются новые высокопрочные металлы и сплавы, способные выдерживать намного большие нагрузки, чем их «предшественники». Эти материалы закономерно будут вытеснять устаревшие аналоги, однако вопрос остаточных напряжений будет стоять всегда, поскольку управление их уровнем и распределением в металле позволяет улучшать любые свойства металлоизделий.

## Библиографический список

---

1. Чернышев Г. Н. / Полезные и опасные остаточные напряжения / Г. Н. Чернышев, А. Л. Попов, В. М. Козинцев // Природа. 2002. № 10.
2. Новиков Н. Н. Теория термической обработки металлов / Н. Н. Новиков. М. : Metallurgy, 1978. 392 с.
3. Кудрявцев И. В. Влияние остаточных напряжений на усталостную прочность стали / И. В. Кудрявцев. М. : ВИНТИ, 1957. 17 с.
4. Анализ способов определения и устранения остаточных напряжений в трубных заготовках / С. П. Буркин [и др.] // Достижения в теории и практике трубного производства. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2004. С. 87–97.
5. Соколов И. А. Остаточные напряжения и качество металлопродукции / И. А. Соколов, В. И. Уральский. М. : Metallurgy, 1981. 96 с.
6. Гайдученко Б. И. Остаточные напряжения и усталость проволоки / Б. И. Гайдученко // Материалы научно-производственного семинара, 27–29 сентября 1965 г., Одесса. М. : Черметинформация, 1967. С. 3–31.
7. Биргер И. А. Остаточные напряжения / И. А. Биргер. М. : Mashgiz, 1963. 232 с.
8. Давиденков Н. Н. Рентгенография в применении к исследованию материалов / Н. Н. Давиденков. М. : Изд. ОНТИ, 1963. 248 с.
9. Давиденков Н. Н. К вопросу о классификации и проявлении остаточных напряжений / Н. Н. Давиденков // Заводская лаборатория. 1959. № 3. С. 318–319.
10. К вопросу о классификации и проявлению остаточных напряжений / Н. П. Щапов [и др.] // Заводская лаборатория. 1959. № 10. С. 252–254.
11. Косолапов Г. Ф. Рентгенография / Г. Ф. Косолапов. М. : Высшая школа, 1952. 332 с.

12. Остаточные напряжения: сборник статей / под ред. В. Р. Осгуда. М. : Иностранная литература, 1957. 395 с.
13. Биргер И. А. Расчет на прочность деталей машин : справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шор, Г. Б. Иосилевич. М. : Машиностроение, 1993. 640 с.
14. Гуревич С. М. Справочник по сварке цветных металлов / С. М. Гуревич. Киев: Наукова думка, 1981. 608 с.
15. Ткачев И. В. Остаточные напряжения в обечайках при различных способах гибки / И. В. Ткачев // Исследования в области пластичности и обработки металлов давлением. Тула: Тульский политехн. ин-т, 1973. С. 170–176.
16. Мочалов Н. А. Определение величины овализации и уровня остаточных напряжений при бухтовом волочении труб / Н. А. Мочалов, М. И. Белов, С. Н. Мочалов // Изв. вузов. Цветная металлургия, 2002. № 1. С. 24–27.
17. Павлов И. М. Определение остаточных напряжений в композиционных материалах / И. М. Павлов // Пластическая деформация нерядовых металлических материалов. М. : Наука, 1976. С. 60–68.
18. Новиков И. И. Теория пластической обработки металлов / И. И. Новиков. М. : Металлургия, 1978. 392 с.
19. Бобылев А. В. Коррозионное растрескивание латуни / А. В. Бобылев. М. : Металлургиздат, 1956. 126 с.
20. Бобылев А. В. Растрескивание медных сплавов: справочник / А. В. Бобылев. М. : Металлургия, 1993. 352 с.
21. Молинина Е. И. Образование трещин при термической обработке стальных изделий / Е. И. Молинина. М. : Машиностроение, 1965. 176 с.
22. Колмогоров В. Л. Напряжения, деформации, разрушение / В. Л. Колмогоров. М. : Металлургия, 1970. 230 с.
23. Рахмарова М. С. Влияние технологических факторов на надежность лопаток газовых турбин / М. С. Рахмарова, Я. Г. Мирер. М. : Машиностроение, 1966. 223 с.
24. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н. Н. Малинин. М. : Машиностроение, 1957. 400 с.
25. Немец Я. Жесткость и прочность стальных деталей / Я. Немец. М. : Машиностроение, 1970. 528 с.
26. Бэкофен В. Процессы деформации / В. Бэкофен. М: Металлургия, 1977. 288 с.

27. Диаграммы горячей деформации, структура и свойства сталей / М.Л. Берштейн [и др.] М.: Металлургия, 1989. 544 с.
28. Кудрявцев И. В. Внутренние напряжения как резерв прочности в машиностроении / И. В. Кудрявцев. М. : Машгиз, 1951. 278 с.
29. Кудрявцев И. В. Влияние остаточных напряжений на усталостную прочность стали / И. В. Кудрявцев. М. : ВИНТИ, 1957. 17 с.
30. Кобрин М. М. Изменение величины остаточных напряжений в стали при циклических нагружениях / М. М. Кобрин; под ред. И. В. Кудрявцева // Усталостная прочность и остаточные напряжения в стали и чугуна. М. : Машгиз, 1955. Вып. 70. С. 35–49.
31. Дятлов А. В. Внутренние напряжения в металлоконструкциях / А. В. Дятлов. М. : Машиностроение, 1935. 112 с.
32. Зигварт Г. Влияние остаточных напряжений на предел выносливости / Г. Зигварт // Усталость металлов. М. : Изд-во иностранной литературы, 1961. С. 27–30.
33. Buhler H. Effect of Reduction and Cross Section by Gold Drawing en Residual Stresses in Rods, Arch / H. Buhler, H. Buchholz. Eisenhüttenwes, 1934. № 7. P. 427–430.
34. Buhler H. Effect of Reduction and Cross Section by Gold Drawing en Residual Stresses in Rods, Arch / H. Buhler, H. Buchholz. Eisenhüttenwes, 1935. № 8. P. 415–466.
35. Хоргер О. Влияние остаточных напряжений на усталостную прочность машин и смежных явлений / О. Хоргер, Г. Нейферт; под ред. В. Р. Осгуда // Остаточные напряжения. М. : Изд. иностранной литературы, 1957. С. 243–280.
36. Павлов А. М. Влияние механических свойств канатной проволоки на работоспособность канатов / А. М. Павлов, Р. Г. Трифонова // Труды НИИМетиза. Сб. № 2. М.: Металлургия, 1968. с. 63–68.
37. Туленков К. И. Остаточные напряжения в стальной канатной проволоке и прибор для их определения / К. И. Туленков, Б. И. Гайдученко, И. М. Гельфанд. М. : ЦНИИЧМ, 1961.
38. Туленков Ф. К. Об изменении напряженного состояния проволоки в процессе ее рихтовки на промежуточных этапах волочения / Ф. К. Туленков // Стальные канаты. Киев: Техника, 1965. Вып 2. С. 364–366.
39. Туленков Ф. К. Зависимость выносливости канатов от внутренних напряжений проволоки / Ф. К. Туленков // Стальные канаты. Киев: Техника, 1965. Вып 2. С. 364–372.



40. Туленков К. И. Влияние остаточных напряжений на работоспособность канатов / К. И. Туленков, Б. И. Гайдученко // Сталь. 1964. № 3.
41. Житков Д. Г. Стальные канаты для подъемно-транспортных машин / Д. Г. Житков, И. Т. Поспехов. М. : Металлургиздат, 1963. 255 с.
42. Красильников Л. А. Микронапряжения в холоднотянутой стальной проволоке / Л. А. Красильников, А. А. Надеждина // Изв. вузов. Черная металлургия. 1963. № 8. С. 151.
43. Златоустовский Д. М. Микронапряжения и статические искажения решетки в холоднотянутой стальной проволоке / Д. М. Златоустовский, Л. С. Уманский // Научные доклады высшей школы. 1958. № 1.
44. Гольдштейн М. И. Специальные стали / М. И. Гольдштейн, С. В. Грачев, Ю. Г. Векслер. М. : МИСиС, 1999. 408 с.
45. Кобрин М. М. Определение внутренних напряжений в цилиндрических изделиях / М. М. Кобрин, Л. И. Дехтярь. М. : Машиностроение, 1965. 175 с.
46. Гликман А. А. Рациональное применение способа Закса при определении остаточных напряжений в сплошных и полых цилиндрах / А. А. Гликман, А. Н. Бабаев // Заводская лаборатория. 1956. № 4. С. 466–472.
47. Anderson R. Journal Institute of Metals / R. Anderson, E. Fahlman. 1924. P. 20–24.
48. Шур Д. М. Силовой метод определения остаточных напряжений / Д. М. Шур // Заводская лаборатория. 1959. № 5. С. 588–591.
49. Соколов И. А. Остаточные напряжения после пластической деформации металлов / И. А. Соколов, В. Л. Колмогоров // Труды УралНИИЧМ. Проблемы деформации металлов. М. : Металлургия, 1968. Т. 6. С. 34–43.
50. Цобкало С. О. Измерение остаточных напряжений путем вырезания столбика / С. О. Цобкало, Д. М. Васильев // Заводская лаборатория. 1949. № 2. С. 223–255.
51. Михайлов О. Н. Измерение остаточных напряжений методом отверстий с помощью проволочных датчиков / О. Н. Михайлов // Заводская лаборатория. 1953. № 2. С. 215–221.
52. Дроздов В. М. Оценка механических методов определения остаточных напряжений / В. М. Дроздов, А. С. Казанцев // Новые ме-



- тоды испытания и обработки материалов. Минск : Наука и техника, 1975. С. 23–29.
53. Красильников Л. А. Релаксационная стойкость и циклическая прочность холоднотянутой проволоки / Л. А. Красильников, В. Я. Зубов. М. : Металлургия, 1973. 264 с.
  54. Охвец И. А. Производство высокопрочной проволочной арматуры / И. А. Охвец. М. : Металлургия, 1984. 344 с.
  55. Баррет Ч. С. Структура металлов / Ч. С. Баррет, Т. Б. Массальский. М. : Металлургия, 1984. Ч. 2. 344 с.
  56. Patent US 2001/0001929. Method for measuring by ultra-sound the residual tension of a pre-stressed bar. Cantor Colburr LLP / В. Basile, В. Lancia. IPC G01N3/08. Publ. 31.05.01.
  57. Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением / В. Л. Колмогоров. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. 836 с.
  58. Поздеев А. А. Остаточные напряжения: теория и положения / А. А. Поздеев, Ю. И. Няшин, П. В. Трусов. М. : Наука, 1982. 112 с.
  59. Ильюшин А. А. Пластичность. Упругопластические деформации / А. А. Ильюшин. М. : Гостехиздат, 1948. Ч. 1. 376 с.
  60. Ильюшин А. А. Пластичность / А. А. Ильюшин. М. : Изд-во АН СССР, 1963. 272 с.
  61. Москвитин В. В. Пластичность при переменных нагружениях / В. В. Москвитин. М. : Изд-во МГУ, 1965. 264 с.
  62. Шевченко Ю. Н. Термопластичность при переменных нагружениях / Ю. Н. Шевченко. Киев: Наукова думка, 1970. 288 с.
  63. Шевченко Ю. Н. Решение осесимметричной пространственной задачи термопластичности на ЭЦВМ типа М-220 / Ю. Н. Шевченко, В. В. Пискун, Ю. Г. Савченко. Киев: Наукова думка, 1975. 107 с.
  64. Пат. РФ № 1746792. МПК G01N3 / 00. Способ определения остаточных напряжений в пластически деформированных деталях / Самохвалов В. Н., Ломовской О. В. № 4793662/28; заяв. 19.02.1990; опубл. 10.06.2000.
  65. Пат. РФ № 2310183. МПК G01N3 / 00. Способ определения остаточных напряжений / Бякова А. В., Мильман Ю. В., Власов А. А. № 2005139811; заяв. 24.12.2005; опубл. 10.11.2007.
  66. Пат. РФ № 2035690. МПК G01B7 / 24. Способ определения напряжений в ферромагнитных материалах на железной основе / Ка-

- чанов Н. Н., Дегтерев А. П., Орлова М. Н. [и др.]. № 4453055/28; заяв. 30.06.1988; опубл. 20.05.1995.
67. А. с. SU № 1619878. МПК G01N27/00. Способ контроля остаточных напряжений в немагнитных металлических изделиях / Погодин Н. С., Румянцев Ю. С., Макаров Г. Н., Учанин В. Н. № 4657798/28; заяв. 02.03.1989; опубл. 10.05.1997.
68. Пат. РФ № 2125252. МПК G01L1/00. Способ определения остаточных напряжений / Колмогоров Г. Л., Мельникова Т. Е., Куропова Н. А. [и др.] № 97103015/28; заяв. 27.02.1997; опубл. 20.01.1999.
69. Пат. РФ № 2340867. МПК G01B7/16. Способ определения остаточных напряжений в деталях с электропроводными покрытиями и устройство для его осуществления / Меркулова Н. С., Гринченко М. И., Иванова Т. О. № 2006129039/28; заяв. 11.08.2006; опубл. 10.12.2008.
70. Пат. РФ № 2020452. МПК G01N3/18. Способ определения остаточных напряжений / Пospelов Д. А. № 4930570/28; заяв. 22.04.1991; опубл. 30.09.1994.
71. Пат. РФ № 2366912. МПК G01L1 / 00. Способ определения остаточных напряжений / Колмогоров Г. Л., Кузнецова Е. В. № 2008111436/28; заяв. 24.03.2008; опубл. 10.09.2009.
72. Радченко В. П. Расчет релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненном слое цилиндрического изделия в условиях ползучести / В. П. Радченко, М. Н. Саушкин // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. Самара: СамГТУ, 2001. № 12. С. 61–73.
73. Гриневич Е. В. Исследование полей остаточных напряжений при поверхностном упрочнении цилиндрических изделий / Е. В. Гриневич, О. В. Колотникова // Прочность и долговечность элементов конструкций. Куйбышев: КПТИ, 1983. С. 88–97.
74. Тропотов А. В. Расчет остаточных напряжений после упругопластической деформации вариационным методом / А. В. Тропотов // Обработка металлов давлением. Свердловск, 1981. С. 139–144.
75. Buhler H. Studies on the dimensional-analytical calculation of residual stresses in drawn letters / H. Buhler, Th. Lehmann, F. I. Schmitt. Eisenhuttenwes, 1965. № 7, Vol. 36. P. 29–34.
76. Buhler H. Studies concerning the dimensionless analytical method for the calculation of residual stresses due to cold working / Buhler H., F. I. Schmitt. Draht, 1966. № 2. P. 57–61.

77. Buhler H. Einfaches. A method for determining internal stresses in the wires / H. Buhler, P. Kreher. *Eisenhüttenwes*, 1968. № 7. Vol. 39. P. 545–551.
78. Мочалов Н. А. Определение величины овализации и уровня остаточных напряжений при бухтовом волочении труб / Н. А. Мочалов, М. Н. Белов, С. Н. Мочалов // *Обработка металлов давлением. Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. 2002. № 1. С. 24–27.
79. Мазеин П. Г. Моделирование остаточных напряжений и деформаций, возникающих при дорновании / П. Г. Мазеин, Д. В. Прусаков, А. В. Цунин // *Известия Челябинского научного центра*. 2001. № 1. С. 43–46.
80. Буркин С. П. Расчет остаточных напряжений в холоднотянутой проволоке / С. П. Буркин, Б. Р. Картак, А. А. Щипанов // *Обработка металлов давлением*. Свердловск: Изд. УПИ им. С. М. Кирова, 1976. № 3. С. 76–80.
81. Абрамов В. В. Остаточные напряжения и деформации в металлах / В. В. Абрамов. М. : Машгиз, 1963. 355 с.
82. Красильщиков Р. Б. Нагрев при холодном волочении проволоки / Р. Б. Красильников. М. : Металлургиздат, 1964. 88 с.
83. Паршин Б. С. Практическое руководство к программному комплексу Deform-3D / Б. С. Паршин, А. П. Карамышев, И. И. Некрасов. Екатеринбург: УрФУ, 2010. 266 с.
84. Пальмов Е. В. Температурный режим волоки при скоростном волочении / Е. В. Пальмов // *Сталь*. 1951. № 5. С. 443–450.
85. Красильников Л. А. Остаточные напряжения и циклическая прочность холоднотянутой и отпущенной стальной проволоки / Л. А. Красильников // *Сталь*. 1956. № 6. С. 562–565.
86. Buhler H. About the reduction of costs resulting residual stresses in cold drawing rods by tightening / H. Buhler, E. Schulz // *Metal*. 1951. № 9/10.
87. Buhler H. The reduction of the costs in bars in cold drawing stresses / H. Buhler, E. Schulz // *Stahl und Eisen*. 1950. № 25.
88. Лапотышкин Н. М. Напряжения в холоднотянутой проволоке в зависимости от величины частных обжатий / Н. М. Лапотышкин // *Уральская металлургия*. 1960. № 6.
89. Перлин И. Л. Теория волочения / И. Л. Перлин, М. З. Ерманок. М. : Металлургия, 1971. 448 с.

90. Козлов В. Т. Остаточные напряжения в контактной проволоке после волочения / В. Т. Козлов, В. Д. Высочин // Стальные канаты. Киев: Техника, 1967. Вып. 4. С. 302–310.
91. Козлов В. Т. К вопросу определения остаточных напряжений после волочения / В. Т. Козлов, В. Д. Высочин // Стальные канаты. Киев: Техника, 1968. Вып. 3. С. 376–380.
92. Недовизий П. И. Скоростное волочение низкоуглеродной проволоки / П. И. Недовизий, И. Я. Тарновский. М. : Metallurgizdat, 1954. 186 с.
93. Christopherson D. G. The Promotion of Fluid Lubrication in Wire Drawing / D. G. Christopherson, H. Naylor // Proc. Inst. Mech. Engrs, London, 1955. Vol. 169. P. 643.
94. Высочин В. Д. Экспериментальное определение остаточных напряжений в стальной проволоке / В. Д. Высочин // Стальные канаты. Киев: Техника, 1969. Вып. 6. С. 284–286.
95. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. Ч. I: Деформация и разрушение / Я. Б. Фридман. М. : Машиностроение, 1974. 472 с.
96. Buhler H. Contribution to the question of residual stresses in drawn steel wire up / H. Buhler, P. Kreher. Draht. 1968. № 8. P. 531–537.
97. Buhler H. Research and development in metal forming / H. Buhler // Bands Sheets Tubes. 1965. № 6. P. 67–70.
98. Савин Г. А. Волочение труб / Г. А. Савин. М. : Metallurgiya, 1982. 160 с.
99. Вишняков М. А. Применение термомеханического упрочнения для повышения характеристик качества поверхности высоконагруженных деталей: справочник / М. А. Вишняков, Б. А. Кравченко // Инженерный журнал. 2002. № 12. С. 15–18.
100. Пат. РФ № 2299251. МПК C21D9/08. Способ термической обработки труб / Пузенко В. И., Николаев А. Н., Выбойщик М. А. № 2006101482/02; заяв. 19.01.2006; опубл. 20.05.2007.
101. Пат. РФ № 2229524. МПК C21D9 / 08, C21D1/40. Способ повышения стойкости труб против коррозионно-механического разрушения / Сокол А. Н., Макаров Ю. В., Осипов М. Л. № 2002120683/022002120683/02; заяв. 29.07.2002; опубл. 27.05.2004.
102. Спицин В. И. Электропластическая деформация металлов / В. И. Спицин, О. А. Троцкий. М. : Наука, 1985. 160 с.

103. А. с. СССР SU 1052550. МПК C21D1/30B23P25/00. Способ снятия остаточных напряжений в металлических деталях / Полнов В. Г., Могильнер М. Н., Сагалевиц В. М. № 3427966; заяв. 23.04.1982; опубл. 07.11.1983.
104. Пат. США № 4229235, МПК C21D9/08. Метод термической обработки труб / Enomoto K., Matsuda N. № 845063; заяв. 25.10.1977; опубл. 21.10.1980.
105. Heng-Sheng Lin. Inhomogeneous deformation and residual stress in skin-pass axsymmetric drawing / Lin Heng-Sheng, Hsu Yuan-Chuan, Keh Chva-Chow // Journal of materials processing technology. 2008. № 2. P. 128–132.
106. Ripoll M. Reduction of tensile residual stress during the drawing process of tungsten wires / M. Ripoll, S. Weygand, H. Riedel // Materials science and engineering. 2010. A527. P. 3064–3072.
107. Паршин В. С. Холодное волочение труб / В. С. Паршин, А. А. Фотов, В. А. Алешин. М. : Металлургия, 1979. 240 с.
108. Patent US EPO № 897764A1, B21C1/22. Method of manufacturing copper tubes when is insensitive to stress corrosion / Nederland B. V. № 98200551.4, Date of filing 20.02.1998. Date of publication 24.02.1999.
109. Пат. США № 4216666, МПК B21C9/22. Метод снятия напряжений в прессованных профилях / Hsiao Wu № US 05/943,017; заяв. 18.09.1978; опубл. 12.08.1980.
110. Буркин С. П. Экспресс-анализ остаточных напряжений в трубах / С. П. Буркин, Г. В. Шимов // Сталь. 2012. № 5. С. 72–75.
111. Шимов Г. В. Способ термической обработки и правки труб для парогенераторов АЭС / Г. В. Шимов, С. П. Буркин, Ан. В. Серебряков, Ал. В. Серебряков, Р. Ф. Исхаков // Черные металлы. 2013. № 11. С. 31–37.
112. Буркин С. П. Электроконтактный нагрев труб с растяжением: сборник трудов конференции «Неделя металлов в Москве», 13–16 ноября 2012 г. / С. П. Буркин, Г. В. Шимов, Ан. В. Серебряков, Ал. В. Серебряков. М. : ВНИИМЕТМАШ, 2013. С. 552–562.

*Учебное издание*

**Буркин** Сергей Павлович  
**Шимов** Георгий Викторович  
**Андрюкова** Елена Анатольевна

## **ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ**

Редактор Н. П. Кубыщенко  
Верстка О. П. Игнатьевой  
Набор Е. А. Андрюковой

Подписано в печать 23.09.2015. Формат 70×100/16.  
Бумага писчая. Плоская печать. Гарнитура Newton.  
Уч.-изд. л. 13,4. Усл. печ. л. 20,0. Тираж 100 экз.  
Заказ 344

Издательство Уральского университета  
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ  
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5  
Тел.: 8(343)375-48-25, 375-46-85, 374-19-41  
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ  
620075, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4  
Тел.: 8(343) 350-56-64, 350-90-13  
Факс: 8(343) 358-93-06  
E-mail: press-urfu@mail.ru

#### **БУРКИН СЕРГЕЙ ПАВЛОВИЧ**

кандидат технических наук, профессор кафедры ОМД УрФУ. Подготовил 6 кандидатов наук. Имеет 120 авторских свидетельств и патентов РФ на изобретения. Опубликовал 440 печатных работ, в т. ч. 7 монографий, учебников и учебных пособий. Основные направления научной деятельности — разработка и исследование технологических процессов прямого совмещения операций и процессов металлургического производства и процессов комбинированного нагружения при обработке металлов давлением.

#### **ШИМОВ ГЕОРГИЙ ВИКТОРОВИЧ**

кандидат технических наук, доцент кафедры ОМД УрФУ. Основные направления научной деятельности — исследование и разработка технологических процессов производства металлопродукции с повышенным эксплуатационным ресурсом.

#### **АНДРЮКОВА ЕЛЕНА АНАТОЛЬЕВНА**

ведущий программист кафедры ОМД УрФУ. Основные направления научной деятельности — исследование вопросов совмещения процессов разлива и обработки металлов давлением.